

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. La ingeniería para la definición y cálculo estructural de la fachada de lamas.

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Engineering for the Design and Structural Analysis of the Slatted Façade.

Matías García del Valle^{a,*}, Adrian Roiz^b, Jordi Alcaine^c

^a Doctor Arquitecto, Arup, Calle Alfonso XII, 13 Madrid

^b Ingeniero Industrial, Arup, Calle Alfonso XII, 13 Madrid

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Arup, Calle Alfonso XII, 13 Madrid

Recibido el 28 de octubre de 2024; revisado el 3 de febrero de 2025, aceptado el 15 de septiembre de 2025

RESUMEN

La capacidad creciente de definición de geometrías complejas en entornos digitales conectados con procesos de fabricación ha posibilitado la ejecución de envolventes sin restricciones de geometría o seriación.

Dos aspectos fundamentales que han ido moldeando la viabilidad constructiva de geometrías complejas han sido: las herramientas de representación y la interconexión entre profesionales. Desde la década de 1990, la utilización de programas de Diseño asistido por ordenador (CAD) puso rápidamente en evidencia la necesidad propia del proceso constructivo de la Arquitectura para crear algoritmos matemáticos específicos. Arquitectos como Frank Gehry, Future Systems, Nicolas Grimshaw o Zaha Hadid, han sido pioneros en el empleo de herramientas digitales para determinar geometrías complejas y su exportación al proceso de construcción con ejemplos como "The Fish", el Museo Guggenheim de Bilbao, el Walt Disney Concert Hall, la Estación de Innsbruck o "The Bubble".

La gran evolución en el campo del software aplicado a diseño de superficies complejas ligado a complejos procesos de producción y fabricación ha sido indispensable para que proyectos singulares de fachadas como el del Estadio Santiago Bernabéu hayan sido posibles.

En este artículo se incluye una exposición detallada del ejemplo que ha supuesto el diseño y construcción de la nueva fachada del Estadio Santiago Bernabéu como nuevo paradigma del proceso de diseño y fabricación digitales en construcción a gran escala.

PALABRAS CLAVE: Fabricación digital, parametrización, doble curvatura, fachada.

©2025 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ABSTRACT

The increasing ability to define complex geometries in digital environments connected with manufacturing processes has enabled the execution of envelopes without geometric or serialization constraints.

Two fundamental aspects that have shaped the constructive viability of complex geometries have been: representation tools and the interconnection between professionals. Since the 1990s, the use of Computer-Aided Design (CAD) programs quickly highlighted the inherent need of the architectural construction process to create specific mathematical algorithms. Architects such as Frank Gehry, Future Systems, Nicolas Grimshaw, and Zaha Hadid have been pioneers in employing digital tools to determine complex geometries and their exportation to the construction process, with examples such as "The Fish," the Guggenheim Museum in Bilbao, the Walt Disney Concert Hall, the Innsbruck Station, or "The Bubble."

The significant evolution in the field of software applied to the design of complex surfaces, linked to complex production and manufacturing processes, has been indispensable for unique façade projects like that of the Santiago Bernabéu Stadium to be possible.

This article includes a detailed exposition of the example set by the design and construction of the new façade of the Santiago Bernabéu Stadium as a new paradigm of the digital design and manufacturing process in large-scale construction.

KEYWORDS: Digital fabrication, parametrization, double curvature, façade.

©2025 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

* Persona de contacto / Corresponding author.

Correo-e / e-mail: matias.garcia@arup.com (Matias García del Valle)

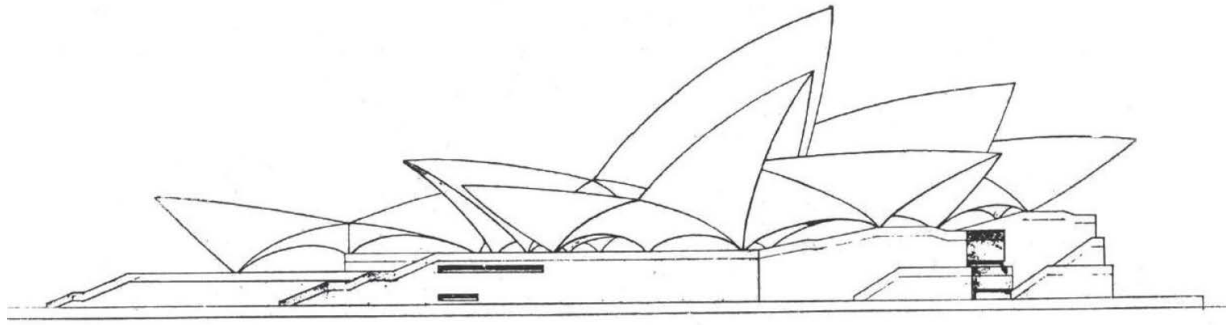


Figura 1. Diseño inicial de Jørn Utzon para el concurso de la Ópera de Sídney. Fuente: "El Escándalo de la Ópera de Sídney" Félix Candela, Revista Arquitectura.

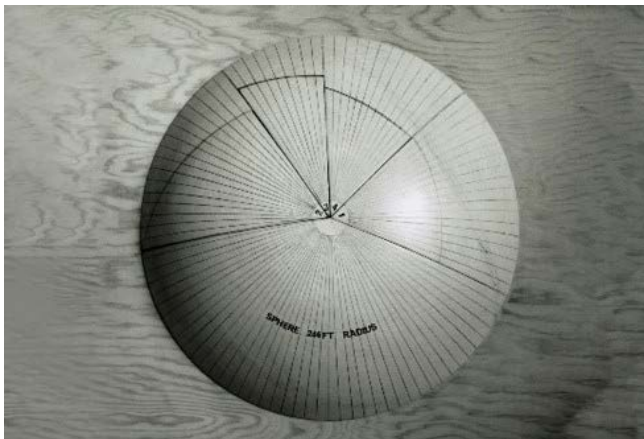


Figura 2. Representación de la solución formal de las superficies de la cubierta de la Ópera de Sydney como parte de la superficie de una esfera. Fuente: "How do you preserve an architectural icon for future generations?".

1. RECORRIDO HISTÓRICO SOBRE LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO PARA FABRICACIÓN DIGITAL.

La evolución de las herramientas digitales ha transformado significativamente el vínculo entre la conceptualización del diseño, la modelización digital y el proceso de construcción de envolventes arquitectónicas. Anteriormente, el diseño y la fabricación eran procesos separados y manuales, lo que a menudo resultaba en imprecisiones, retrasos y desperdicio de recursos.

Dos aspectos clave han moldeado la viabilidad de construir geometrías complejas: el desarrollo de herramientas de representación y diseño, y la interconexión entre profesionales. Los avances en software como CAD y CAM han permitido la representación de geometrías intrincadas, mientras que la colaboración entre diseñadores y fabricantes asegura que los diseños sean construibles y que los elementos puedan ser fabricados y ensamblados eficientemente.

Un ejemplo de ello es el proyecto de la Ópera de Sídney diseñado por el arquitecto danés Jørn Utzon en 1957. Tras ganar un concurso internacional para la creación de un espacio permanente para la Sinfónica de la capital australiana, la presencia de Ove Arup como consultor estructural fue crucial

para convertir en una realidad arquitectónica los bocetos del joven arquitecto danés.

En este caso, previo a las herramientas mencionadas anteriormente, las características velas no eran fácilmente definibles matemáticamente debido a su complejidad formal y baja o nula sistematización. Mantener este diseño hubiese supuesto construir en torno a 2.500 dovelas para formar las nervaduras, con un peso superior a 10 toneladas, y 4.000 placas revestidas de 3 toneladas cada una.

Ante la inviabilidad de esta opción, se planteó como alternativa utilizar una superficie de translación tomando una parábola como generatriz a través de una elipse y simplificar la forma. Sin embargo, la superficie seguía siendo demasiado compleja por lo que finalmente se optó por alterar la geometría de la cubierta de modo que todas las superficies perteneciesen a una misma esfera de radio constante permitiendo producir en masa las dovelas.

Estas modificaciones sobre el proyecto permitieron construir la Opera de Sídney tal y como la conocemos hoy. Sin embargo, a pesar de la alteración geométrica y la optimización del número de dovelas, la ejecución del proyecto supuso un sobrecoste de treinta millones de dólares respecto a los siete considerados en el proyecto inicial, una demora en los tiempos y un empleo de medios muy por encima de lo previsto.

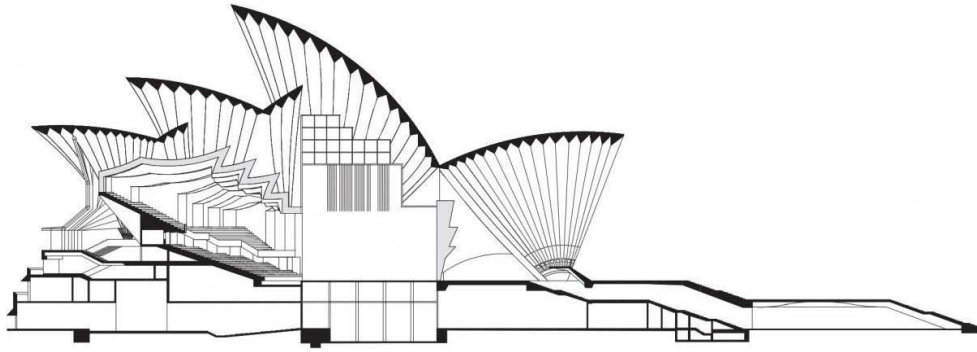


Figura 3. Diseño final de las velas de la Ópera de Sydney tras la optimización de la geometría inicial. Fuente: "El Escándalo de la Ópera de Sydney" Félix Candela, Revista Arquitectura.

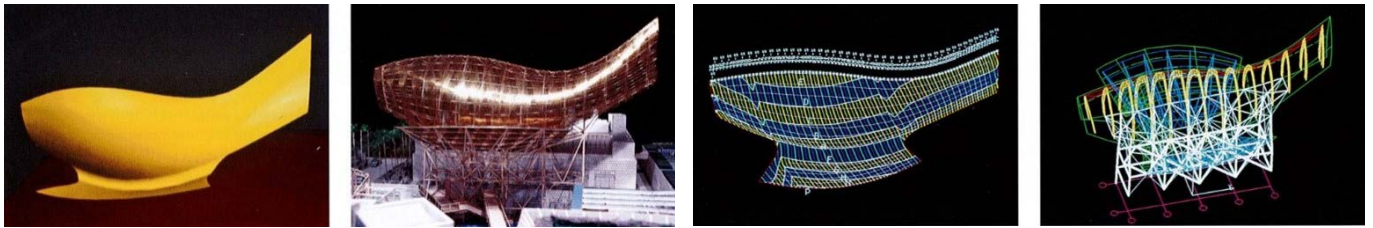


Figura 4. Fotografías del proceso de digitalización del modelo físico e imágenes del modelo CAD generado en CATIA a partir de la nube de puntos obtenida del escáner 3D.

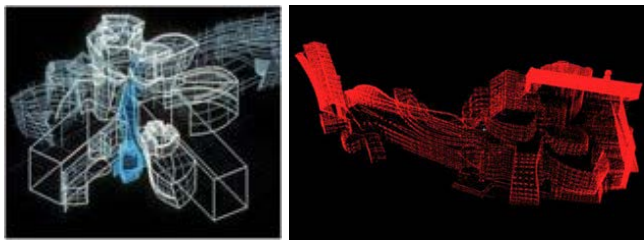


Figura 5. Nube de puntos obtenida del escaneado tridimensional del modelo y posterior modelo de superficies exteriores en CATIA. Fuente: "Architecture in the digital age" B. Kolarevic.

Durante la última década del siglo XX algunos estudios de Arquitectura como Frank Gehry, Future Systems o Nicolas Grimshaw proponen emplear las herramientas digitales para determinar geometrías complejas de una manera inequívoca y así poder exportarla al proceso de construcción.

No obstante, mientras que la definición geométrica de la forma del edificio era digital, la generación de ésta y su transmisión hacia el proceso de construcción era analógica. Para la generación digital del modelo se siguieron los siguientes pasos. Partiendo de una maqueta se realizó un escáner 3D obteniendo un conjunto de puntos identificados mediante tres coordenadas, representados en una serie de dibujos 2D en formato físico, que se digitalizaría generando un modelo CAD en CATIA. El primer Proyecto en el que se emplea un archivo CAD para definir una forma compleja es la escultura denominada "The Fish", encargada por el Ayuntamiento de Barcelona a Frank Gehry con el contexto de los Juegos Olímpicos de 1992. En el proceso de creación se parte de una maqueta y se escanea obteniendo un conjunto de puntos identificados mediante 3 coordenadas, representados en una serie de dibujos 2D en formato físico, que se digitalizaron generando un modelo CAD en

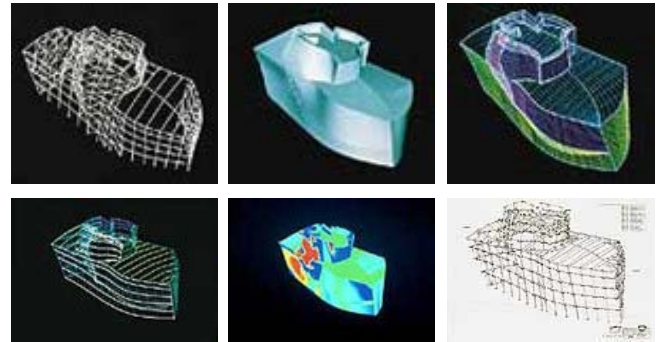


Figura 6. Secuencia de imágenes del modelizado digital del proceso de definición geométrica en CATIA para su posterior exportación a BOCAD . Fuente: "Managing the construction of the Museum Guggenheim Bilbao" University of Harvard.

CATIA. La empresa constructora se vio obligada a utilizar este mismo archivo digital para extraer de él la información y así poder identificar cada uno de los elementos para su posterior fabricación.

Dos casos coetáneos de especial interés son el Museo Guggenheim de Bilbao y el Walt Disney Concert Hall, en los que la envolvente está formada por una geometría basada en superficies NURBS con doble curvatura.



Figura 7. Pabellón "Bubble", Bernhard Franken. Fuente: www.franken-architekten.de

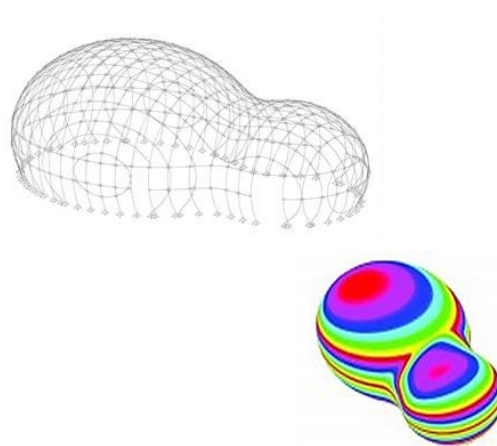


Figura 8. Definición geométrica de la subestructura de aluminio mediante secciones ortogonales paralelas a la envolvente y análisis de curvaturas gaussianas de la envolvente exterior. Fuente: "Novos processos de construção em arquitetura" G. Castro L.P. Esteves.

El proceso para la realización de la envolvente de titanio del Museo Guggenheim de Bilbao incluyó varios pasos. Primero se digitalizó el modelo físico para obtener una nube de puntos, de la cual se generaron curvas Splines y superficies NURBS que definieron la geometría de la envolvente. A continuación, se creó una estructura principal que se ajustó a la envolvente mediante una subestructura que sirvió como soporte y fijación. Finalmente, gracias a la maleabilidad del titanio y las condiciones en la industria local, fue posible acomodar la curvatura del modelo físico sin necesidad de curvado en caliente ni un análisis de la curvatura gaussiana, generando planos de la estructura y subestructura. Como el contratista acababa de incorporar un proceso CAD/CAM a través del software BoCAD, fue posible resolver la totalidad de la envolvente mediante 20 tipos de paneles plegados, de los cuales 4 cubrían el 80% de la superficie, y los otros 16 para casos singulares, con un total 33.000 elementos de titanio.

El estudio de Frank Gehry había cambiado la forma en la que se definía la geometría de los proyectos. A pesar de que el origen de la forma seguía siendo analógico, mediante croquis y modelos físicos, la definición de la geometría para trasladarla al constructor para su traslación a los planos de fabricación se realiza íntegramente en un entorno tridimensional, paramétrico y digital.

Anteriormente, las firmas de arquitectura entregaban planos en dos dimensiones a un contratista, quien tenía que crear su propio conjunto de dibujos o modelos que tenían que ser aprobados por el arquitecto antes de pasar a la fabricación. Sin embargo, gracias a CATIA, los contratistas pudieron participar en etapas tempranas del proceso de diseño y referirse directamente a los modelos digitales tridimensionales de Gehry, lo que permitió ahorrar tiempo y dinero, y hacer que la cadena de diseño fuera más eficiente.

Los sistemas constructivos y de fabricación no están inherentemente vinculados a la forma, pero sí quedan condicionados por las características geométricas de ésta. En el proyecto del Bubble, realizado por el estudio ABB Architekten y Bernhard Franken para BMW en la feria del IAA en 1999. Una de las principales diferencias con los proyectos anteriores fue la generación digital de la forma sin intervención a priori del arquitecto.

Los arquitectos querían que el pabellón se pareciera a una gota de agua y mostrara la inestabilidad entre la presión interna y la tensión superficial, por lo que en lugar de simplemente esbozar la forma de una gota de agua y transferirla al ordenador, utilizaron un programa de animación propio de la industria cinematográfica para simular la fusión de dos gotas de agua y generar la forma final. La forma ideal de una gota de agua se utilizó como punto de partida y los campos de fuerza que afectan a la sustancia principal se simulaban en el ordenador. La forma final surgió a través de cambios en parámetros seleccionados y la interacción entre los diseñadores y los ordenadores.

El proyecto del Bubble exploró la relación entre la forma y los sistemas constructivos y de fabricación. La geometría de la envolvente se consideró inicialmente para proporcionar la rigidez necesaria, pero finalmente se utilizó una malla ortogonal de pletinas de aluminio portante. La superficie de doble curvatura, sin limitaciones geométricas de la envolvente, requirió una fabricación singular para cada uno de los 305 paneles acrílicos termo-conformados, con información del modelo digital exportada para la fabricación de los moldes y el corte láser de las pletinas de aluminio de la subestructura.

La evolución de la tecnología digital en Arquitectura se produce coincidiendo con el cambio de siglo. La definición geométrica digital de las formas complejas iniciadas en la última década de siglo XX se completa mediante el uso de software capaz de establecer relaciones topológicas entre los elementos. Al mismo tiempo, la necesidad de construir edificios con envolventes de geometrías complejas bajo unos requisitos prestacionales crecientes, requiere de la utilización de la tecnología de fabricación digital (CAM), procesos que han ido desarrollándose paralelamente a la materialización de formas complejas.

Este sistema aprovecha la capacidad de definir un proceso de fabricación mediante la información transmitida por el modelo digital y así interpretarla transmitiéndola como órdenes de mecanizado a las máquinas de CNC.

Un ejemplo que modifica la definición geométrica del proyecto a partir del sistema de fabricación digital empleado es el de la Estación de funicular de Innsbruck que proyectó



Figura 9. Imagen de una de las estaciones de funicular de Innsbruck. Fuente: Zaha Hadid Architects.

Zaha Hadid en 2004, en el que se diseña un conjunto de estaciones, cada una con una forma distinta, utilizando un revestimiento de vidrio serigrafiado opaco sobre una estructura interior metálica.

Para lograr la compleja geometría y la ausencia de repetición entre los módulos de vidrio, se empleó un proceso de fabricación digital desarrollado por la consultoría Design-to-Production. El sistema constructivo y la fabricación del material se adaptaron a la geometría definida por Zaha Hadid, utilizando perfiles de polietileno compacto en lugar de una subestructura de acero o aluminio para reducir costes y simplificar el proceso de fabricación. El proceso de diseño implicó la creación de códigos G a partir de un modelo Rhino del arquitecto, que se usaron para recortar los elementos desde placas con máquinas CNC de 5 ejes.

La gran evolución en el campo del software aplicado a diseño de superficies complejas, ligado a complejos procesos de producción y fabricación, ha sido indispensable para que proyectos singulares de fachadas, con gran cantidad de parámetros distintos a tener en cuenta, sean posibles.

1.1. La envolvente del Estadio Santiago Bernabéu como paradigma del Diseño y fabricación digital a gran escala.

La reforma del Estadio Santiago Bernabéu supone un nuevo reto para el Proceso ya asentado de Diseño para Fabricación

digital en Arquitectura. En este caso, la aplicación supone un desafío de escala, precisión y plazo. Como se ha comentado anteriormente, desde principio de siglo XX, son numerosos los casos de Arquitectura donde se ha definido una geometría compleja de forma digital y esta se ha trasladado a un proceso de fabricación de forma directa. La singularidad de este caso reside en la escala de la intervención y la precisión requerida para la misma.

La envolvente se compone de más de 13.000 lamas de acero inoxidable cada una de ellas con una definición geométrica singular. Esta imagen dinámica y variable le otorga a la fachada del aspecto orgánico y fluido tan característico del proyecto.

Las herramientas digitales, como hemos visto, ya están desarrolladas para definir con precisión, de forma digital, la doble curvatura de cada una de estas láminas y todos sus componentes. No obstante, el Bernabéu supone un cambio de escala para los ejemplos de envolventes de geometría compleja, con un proceso de fabricación digital automatizado.

La escala de la envolvente requería la involucración de varias empresas especialistas en fachadas para poder fabricar de forma simultánea todos los componentes. El modelo maestro era el generado por Arup y cada uno de los fachadistas lo exportaba a su flujo de comunicación digital, generando a partir de parametrizaciones todos los componentes.

La escala y el plazo imposibilitaban la definición de componentes de forma manual, y el tamaño de los archivos impo-

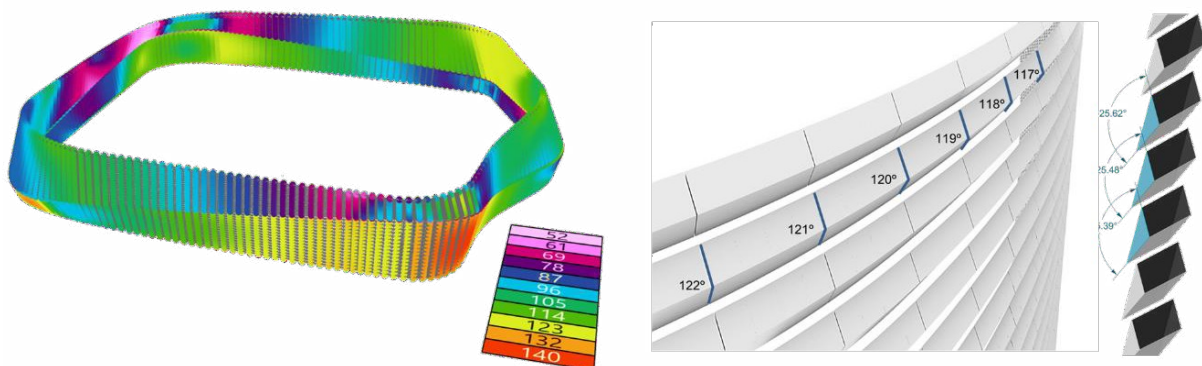


Figura 10. Análisis geométrico de la envolvente.

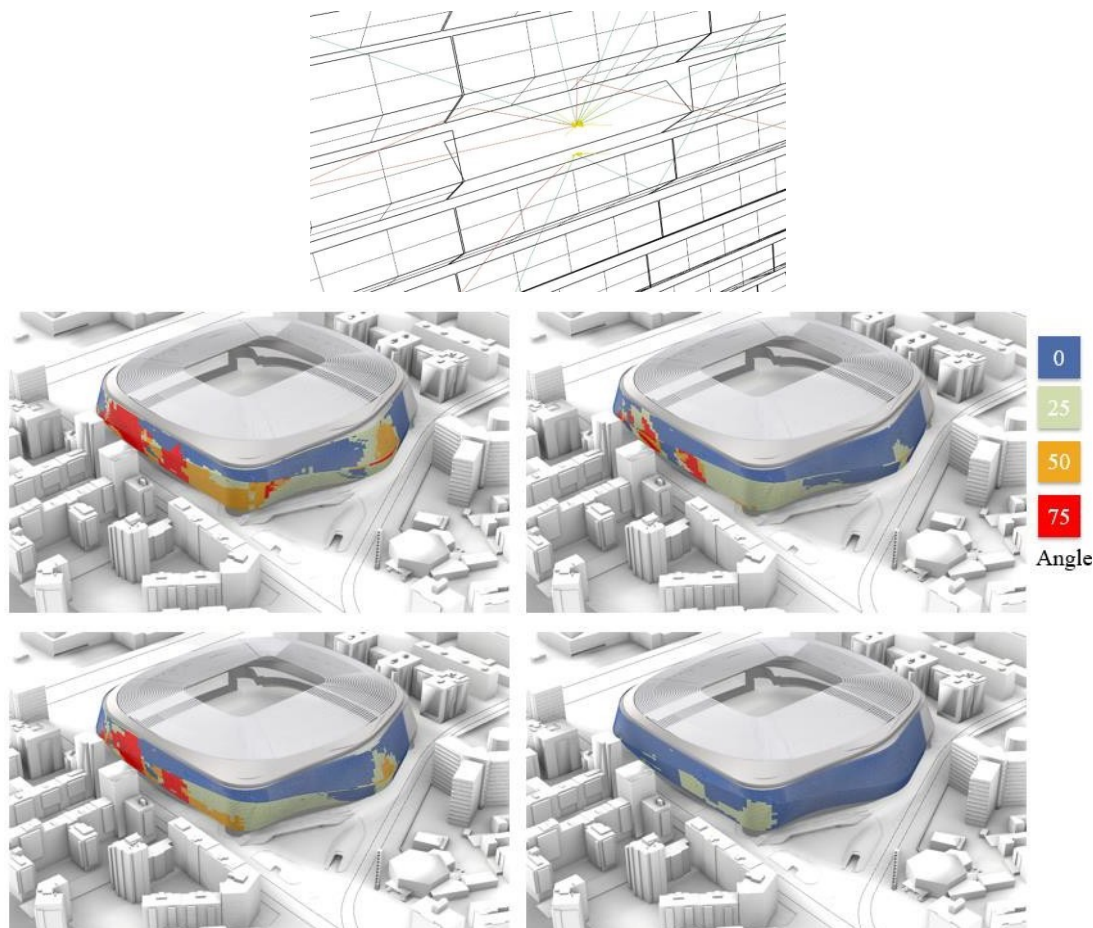


Figura 11. Imágenes del proceso de optimización del ángulo de fachada para evitar deslumbramientos al entorno urbano.

sibilitaban poder visualizar todas las lamas al mismo tiempo. De forma que el trabajo de parametrización tuvo que ser validado por partes antes de comenzar la exportación de fabricación de cada componente.

El proceso general se podría dividir en dos etapas, la etapa de diseño, donde se emplean herramientas digitales para la definición de la geometría y su análisis prestacional, siempre en entornos digitales. La etapa de fabricación, donde se traslada la geometría inicialmente definida a un conjunto de procesos de fabricación digital de componentes aislados para su ensamblaje final para formar las lamas.

2. ETAPA DE DISEÑO

2.1. Proceso digital de análisis del comportamiento de la fachada

El inicio de la etapa de Proyecto consiste en realizar una serie de análisis del comportamiento de la envolvente de lamas ante requisitos fundamentales que no pueden ser evaluados con herramientas convencionales.

La nueva piel diseñada por el Equipo de Arquitectura que hizo el concepto, revestía el estadio existente con unas

lamas de acero inoxidable por completo. El entorno urbano requería de un análisis del impacto a nivel de radiación solar y deslumbramiento. Este tipo de análisis no están recogidos por la normativa y por lo tanto requieren de herramientas y protocolos específicos. Arup ha desarrollado en otros proyectos internacionales una metodología de análisis digital que permite evaluar el impacto visual en el observador, tanto un conductor como cualquier persona desde las viviendas cercanas. Arup realizó un estudio y optimización de la geometría de las lamas para reducir al mínimo las molestias que la nueva piel produciría sobre el entorno.

El proceso supuso el ajuste de la inclinación de la “pala” superior de las lamas en las orientaciones donde se pudo ver que en algún momento del año producían deslumbramientos que superan los umbrales recomendados. Adicionalmente se limitó la reflectancia especular de las chapas de acero para poder controlar los umbrales de deslumbramiento.

Adicionalmente al estudio de reflexiones producidas por la nueva envolvente del Estadio, era necesario evaluar el comportamiento ante el viento de una piel permeable y con geometría cambiante. El análisis de túnel de viento necesario para obtener cargas de viento para la estructura no tiene por la escala, caracterizada la envolvente con su permeabilidad y geometría. Este trabajo comienza con la comparación de los resultados del modelo CFD con valores de presión aportados por la empresa Wacker en unos puntos de control seleccio-

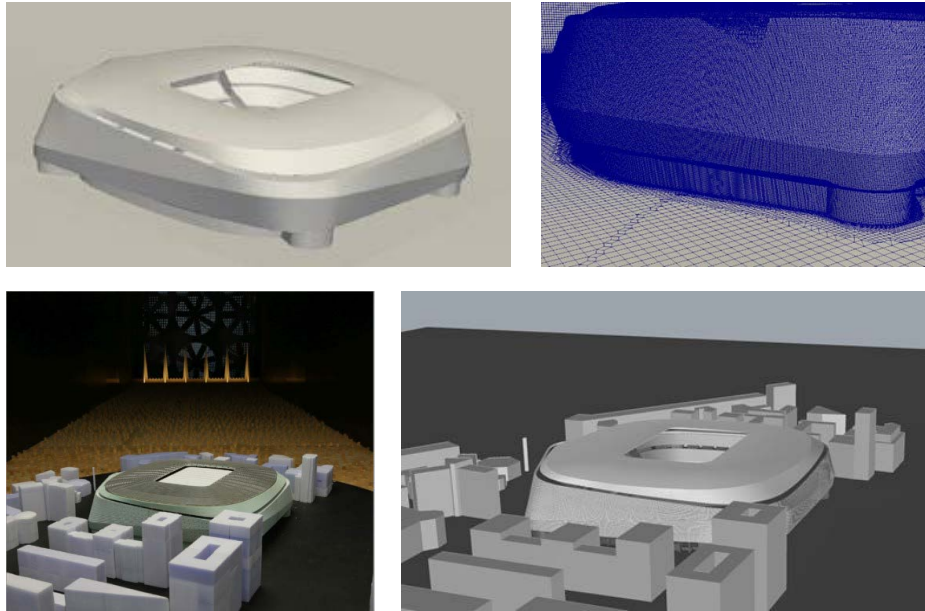


Figura 12. Imágenes del túnel de viento y del modelo virtual.

nados conjuntamente. Este ejercicio permitió validar que el modelo CFD reproduce los valores de presión con fidelidad al túnel de viento, así como calibrar los siguientes aspectos del modelo CFD del estadio:

- geometría del estadio y el entorno
- modelo de turbulencia y las condiciones de entrada del viento
- tiempo de computación
- metodología de obtención de picos

Para llevar a cabo la comparación de resultados CFD con los valores del túnel de viento se crea un modelo geométrico similar al utilizado para realizar el túnel de viento. Se ha localizado los puntos de medición en la fachada proyectando las imágenes proporcionadas por el realizador del túnel de viento sobre la fachada modelada.

Se construye un dominio de 5 veces la altura del estadio y 10 veces la altura del estadio aguas abajo. En la parte más ale-

jada al estadio se ha discretizado el espacio en celdas de 10m de lado a partir de los 100m de altura y de 5m de lado por debajo de esa cota, refinando más la malla cerca del suelo. De esta manera se puede resolver la escala de turbulencia atmosférica especificada por el Eurocódigo 1 (entre 30 y 300m).

El número total de celdas del modelo es de 10 millones. En las siguientes imágenes se muestran los detalles del mallado utilizado.

Para las simulaciones se ha utilizado un perfil de entrada dinámico, cuyas estadísticas promediadas en el tiempo, se corresponden con los perfiles indicados en el Eurocódigo 1 y pueden verse en las siguientes figuras. Este perfil ha sido generado mediante la técnica de generación sintética de turbulencia, cuyas características se ven en las tablas de la [figura 13](#):

Para las simulaciones se utiliza un modelo de tipo DES (Detached Eddy Simulation), que es un modelo híbrido RANS-LES implementando RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) allí donde la escala de turbulencia es más peque-

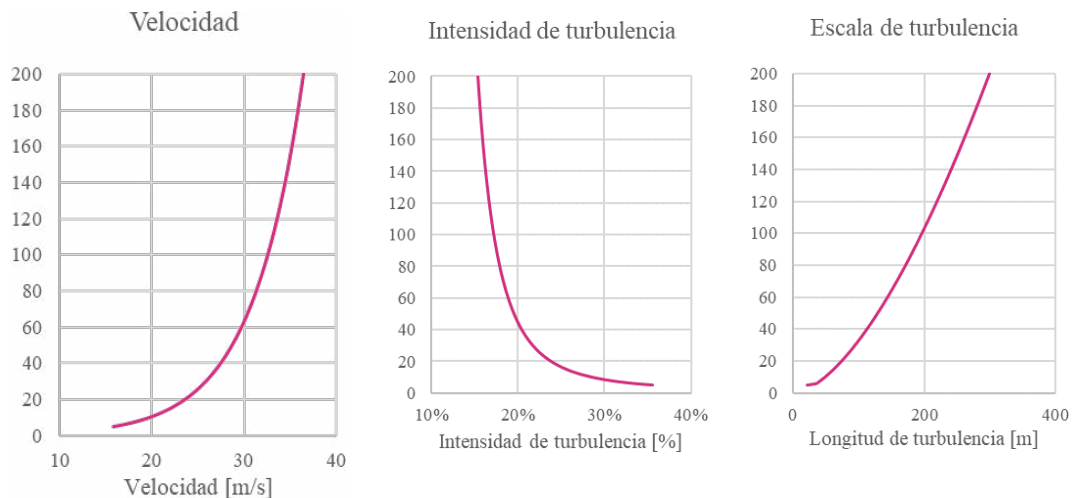


Figura 13. Perfil de turbulencia del viento de entrada al dominio.

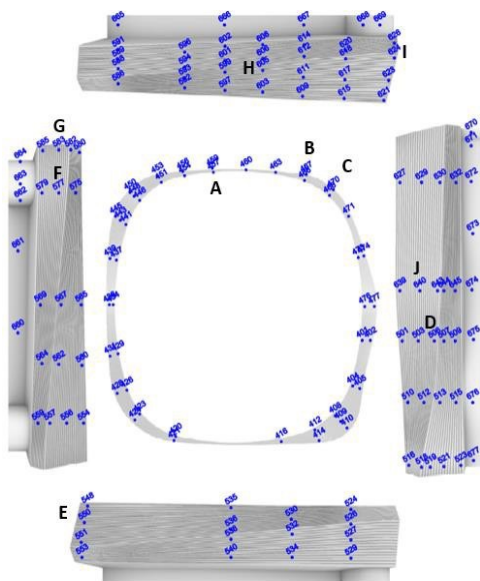


Figura 14. Posición de sensores en la envolvente.

ña que el tamaño de la malla y LES (Large Eddy Simulation) en el resto del dominio. Concretamente, se ha utilizado el modelo SpalartAllmarasDDES. Para llevar a cabo la validación del modelo CFD con el túnel de viento se ha realizado una simulación del estadio con viento norte. Se han comparado los resultados para 10 puntos de control. Los puntos de control seleccionados se corresponden con las zonas con mayor carga pico medida para una simulación con viento Norte.

Para cada uno de estos puntos se ha calculado los picos de presión y succión y estos valores se han comparado con los valores pico de presión y succión aportados expresamente para este fin por la empresa Wacker, que ha realizado el túnel de viento. En la [figura 14](#) se detalla la localización de dichos sensores:

El cálculo de picos se ha realizado utilizando la metodología de Gumbel, que consiste en los siguientes pasos:

- La serie temporal se divide en 10 periodos de tiempo y se obtiene el máximo de cada uno.
- Con estos 10 valores, se elabora una distribución de probabilidad para 10 minutos (en este caso una distribución de Gumbel).

$$X = \mu - \beta \ln(-\ln(U))$$

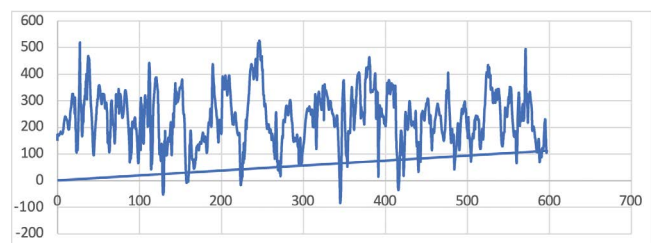
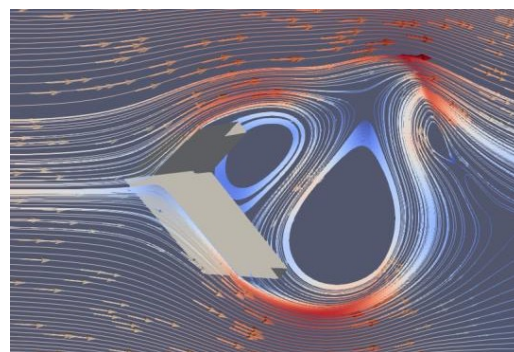
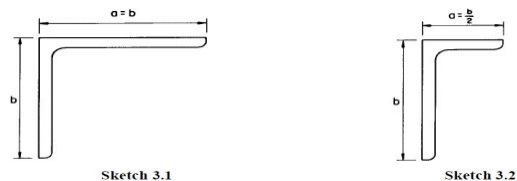


Figura 15. Simulaciones para laminas cuya pala superior es la mitad que la lama inferior, se comparan los valores obtenidos en el CFD con los valores extraídos del ESDU82007.



mas. En primer lugar, se ha realizado una calibración del modelo CFD para el cálculo de presiones en las laminas. En segundo lugar, se ha realizado un estudio para evaluar que el modelo geométrico utilizado para el cálculo de cargas sobre laminas es correcto y que se representa adecuadamente la porosidad del estadio.

En los túneles de viento, a menudo se simplifican las mediciones de los elementos de fachada permeable debido a la dificultad de representarlos a escala. Sin embargo, se ha validado que los esfuerzos obtenidos en simulaciones coinciden con los de elementos sin alteraciones. Los esfuerzos en las laminas de la fachada se han validado con datos del ESDU82007 para varios ángulos de ataque.

En la [tabla 1](#) se detallan los esfuerzos obtenidos con cada uno de los modelos y con el benchmark para las laminas con palas de distinto tamaño.

Este resultado demuestra que el CFD puede ser aplicado con precisión suficiente sobre laminas. El segundo paso, es verificar que el modelo CFD en gran escala reproduce fielmente la pérdida de presión real. Para llevar a cabo el estudio de las cargas sobre las laminas de fachada se ha construido un modelo que incorpora el detalle de laminas en las áreas de estudio. Estas áreas de estudio se corresponden con las áreas de fachada que utiliza el túnel de viento para el cálculo de cargas.

El resto de la fachada, que no es el área de estudio se ha modelado mediante una simplificación geométrica que mantiene el nivel de porosidad de la fachada real por lo que a efectos de comportamiento fluido responde adecuadamente, permitiendo limitar el número de celdas del modelo a un entorno de 25-30 Millones.

En este apartado se presentan los estudios realizados para garantizar que el modelo simplificado de fachada utilizado en el estadio (excepto en las áreas de análisis de laminas), reproduce adecuadamente la porosidad del estadio.

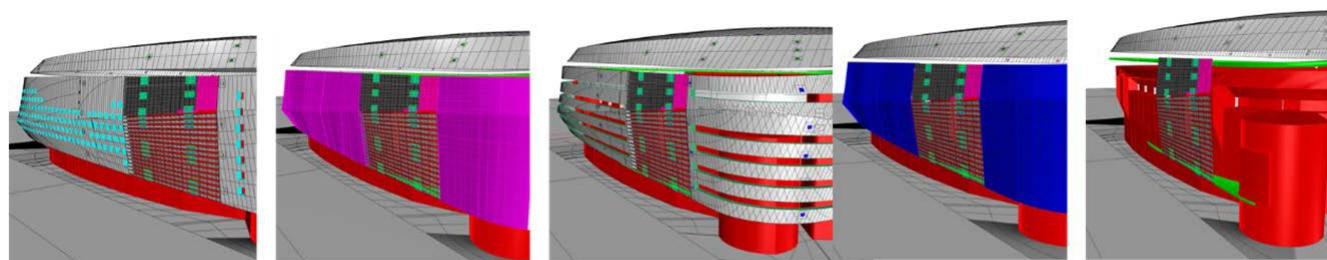
En la [figura 16](#) se muestran los modelos de fachada evaluados.

Para cada una de estas fachadas se ha evaluado:

- Flujo específico que pasa por el área de estudio.

- Para calcular el pico, se extrae el valor superior al tercer cuartil, correspondiente con el percentil 78. De modo que la probabilidad de que este valor de presión se exceda a lo largo de la línea temporal es un 22%.

Una vez calibrado el modelo de CFD con el túnel de viento realizado en laboratorio, se realiza el estudio de las propias la-



Variant 1: Facade with holes
Agujeros Cuadrados Variant 2: Thick Porous zone (30%)
Porosa con espesor Variant 3: Facade with horizontal Holes
Agujeros Horiz Variant 4: One cell porous zone
Porosa con 1 celda Variant 5: No facade
Sin Fachada

Figura 16. Imagen de las fachadas simplificadas estudiadas.

TABLA 1
Comparación de los esfuerzos obtenidos del CFD con el benchmark (ESDU82007)

Model	0°		30°		45°		60°		90°	
	<i>Cd [-]</i>	<i>Cl [-]</i>	<i>Cd [-]</i>	<i>Cl [-]</i>	<i>Cd [-]</i>	<i>Cl [-]</i>	<i>Cd [-]</i>	<i>Cl [-]</i>	<i>Cd [-]</i>	<i>Cl [-]</i>
Benchmark	0.75	-0.2	1.25	0.55	1.4	0.6	1.5	0.75	1.8	0.1
CFD	0.65	-0.2	1.13	0.55	1.3	0.64	1.26	0.76	1.6	0.15
Diferencia	13%	0%	9%	0%	7%	6%	16%	1%	11%	

TABLA 2.
Comparación del flujo de aire y PAF para las distintas configuraciones.

Variante	Flujo de aire	Flujo de aire/ presión media en las lamas (Parte inferior)	PAF flujo/presión en la cara exterior	PAF flujo/presión en la cara exterior e interior
Agujeros cuadrados	1.91 m³/h	34.8 m⁴/s/kg	36.9 m⁴/s/kg	51.4 m⁴/s/kg
Porosa con espesor	1.92 m³/h	34.5 m⁴/s/kg	35.8 m⁴/s/kg	47.9 m⁴/s/kg
Agujeros horizontales	1.96 m³/h	34.4 m⁴/s/kg	36.2 m⁴/s/kg	48.2 m⁴/s/kg
Porosa con 1 celda	1.88 m³/h			
Sin Fachada	2.01 m³/h			

- Distribución de los valores presión media en las lamas de la fachada. Esto se ha hecho a través de simulaciones estacionarias.
- Distribución de los valores pico de presión en las lamas de la fachada. Esto se ha hecho a través de simulaciones dinámicas.

Para cada una de las fachadas simplificadas, se ha calculado la ratio existente entre el flujo que pasa por el área de estudio (fachadas en detalle) y la presión media sobre las lamas. Hemos llamado a esta ratio PAF (Pressure-Air Flow Coefficient)

$$PAF = \frac{\text{air flow} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\text{average pressure at lowers} [Pa]}$$

La [tabla 2](#) resume los valores obtenidos para las diferentes fachadas simplificadas, que son muy similares en todos los casos.

Dada la complejidad y la diversidad de soluciones de lamas en la fachada del estadio, para el estudio de cargas se ha decidido seleccionar un conjunto de casos de estudio, que basados en los resultados sectoriales del túnel de viento, intentan capturar:

- Los casos más desfavorables de presión y succión.
- Las diferencias en el comportamiento entre lamas curvas y lamas rectas.

Se ha escogido tres escenarios de presión por su distribución de lamas, permeabilidad y forma de la fachada. Los casos escogidos son:

- Fachada Oeste/Dirección Oeste: las lamas son muy permeables y la fachada es recta.
- Fachada Sur/Dirección Sur: en este caso la permeabilidad es más baja y la fachada es recta.
- Fachada Sureste/Dirección Sureste: caso de presión en una esquina.



Figura 17. Esquema de las direcciones de ataque del viento escogidas para la modelización del CFD en presión.

Se ha escogido tres escenarios de succión por su distribución de lamas, permeabilidad y forma de la fachada. Los casos escogidos son:

- Fachada Oeste/Dirección Norte: en este caso se evalúa donde la velocidad es perpendicular a la fachada, se presuponen cargas menores que en las esquinas
- Fachada Sureste/Dirección Sur: la succión se produce en una esquina donde se producen las succiones más altas
- Fachada Sureste/Dirección Sureste: al igual que el anterior, se producen succiones altas en este caso más grandes según el túnel de viento, por lo que es positivo simular en ambas direcciones.



Figura 18. Esquema de las direcciones de ataque del viento escogidas para la modelización del CFD en succión.

Estos casos corresponden con los siguientes casos del túnel de viento para la subestructura:

Para llevar a cabo el estudio de cargas sobre fachada se han realizado simulaciones transitorias para cada uno de los casos seleccionados, y en cada caso se ha calculado:

- Distribución de valores pico de presión y succión a lo largo de la fachada, para la pala superior y la pala inferior.
- Valores netos de carga sobre las palas (es decir carga en cara exterior menos carga en cara interior).

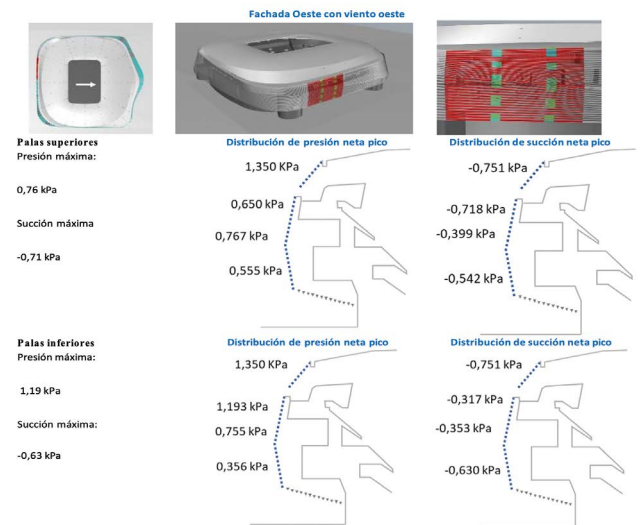


Figura 19. Ejemplo de datos de carga de viento obtenidos para un ángulo de ataque determinado.

De este análisis, se observa que la esquina Sureste tiene más carga cuando el viento ataca desde el sur que desde el suroeste. En la siguiente figura, se representan dos momentos de la velocidad del viento para los dos ángulos de ataque. En este caso, se observa que si el viento incide desde el suroeste el desprendimiento de la capa límite y el obstáculo de la torre produce menor carga de lo esperado.

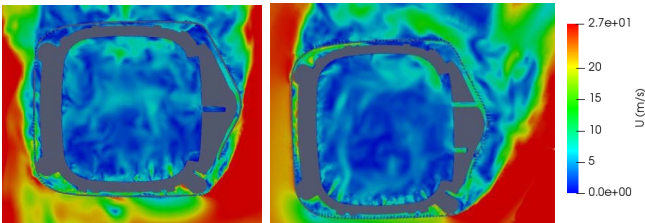


Figura 20. Velocidad del viento en planta para la fachada sureste.

De los análisis anteriores se han extraído los valores de carga pico para las palas superiores e inferiores que se encuentran en el rango de +/- 1 kPa de presión y succión.

Estos valores de presión y succión no incorporan ni corrección (intervalo de confianza de CFD), ni la amplificación dinámica.

Pala superior	Presión neta pico	Succión neta pico
	0,92 kPa	-0,80 kPa
Pala inferior	Presión neta pico	Succión neta pico
	1,20 kPa	-1,05 kPa

El resultado de este estudio determinó que las cargas que inicialmente había establecido el Túnel de viento para la envolvente de lamas eran conservadoras y que era seguro considerarlas ya que no existía riesgo de que una vez tenida en cuenta la geometría y permeabilidad real de la envolvente, se produjeran presiones o succiones superiores en las zonas más críticas analizadas.

2.2. Búsqueda de un sistema constructivo adecuado para ser construido únicamente por fabricación digital:

El proceso se inicia con la búsqueda de un sistema constructivo que permita la fabricación digital de las lamas. El reto para el equipo de Arup era identificar un sistema constructivo capaz de ser fabricado en serie de forma ágil y directamente desde la información generada en el modelo digital, y que pudiera controlar la geometría final de la chapa de acero exterior con precisión y manteniendo la doble curvatura que exigía la idea inicial del concepto arquitectónico.

La agilidad de la obra requería un proceso de construcción modular donde las lamas sean elementos autoportantes capaces de salvar la distancia entre los montantes estructurales distanciados una media de 7m. Por lo tanto, cada lama dispondría de un elemento estructural principal que serviría de soporte para una serie de cuadernas que dotarían a la chapa de acero de 1,8mm de espesor, de la forma final.

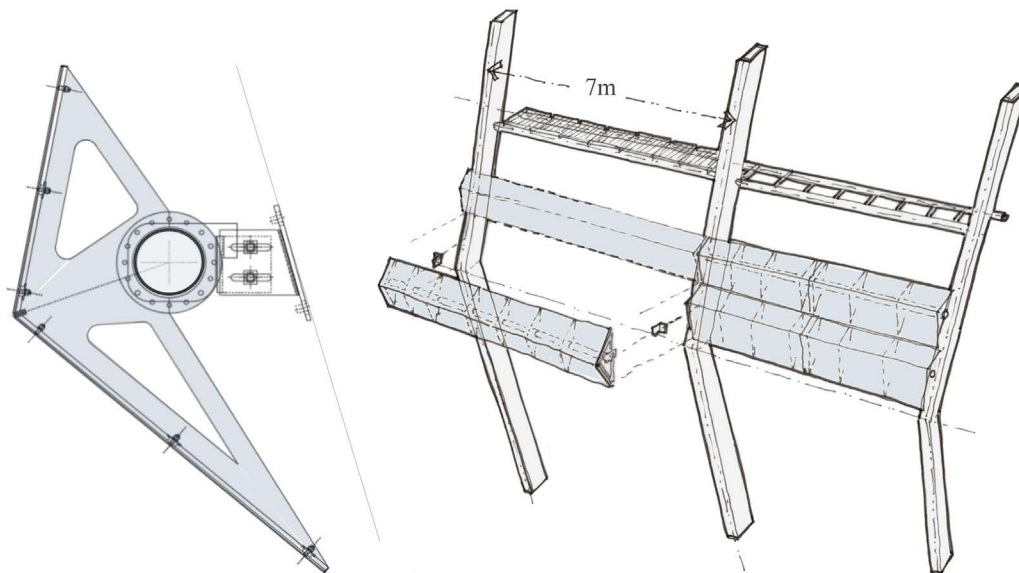


Figura 21. Primeros croquis para explorar la solución constructiva de lamás como módulos autoportantes con instalación únicamente desde el exterior.

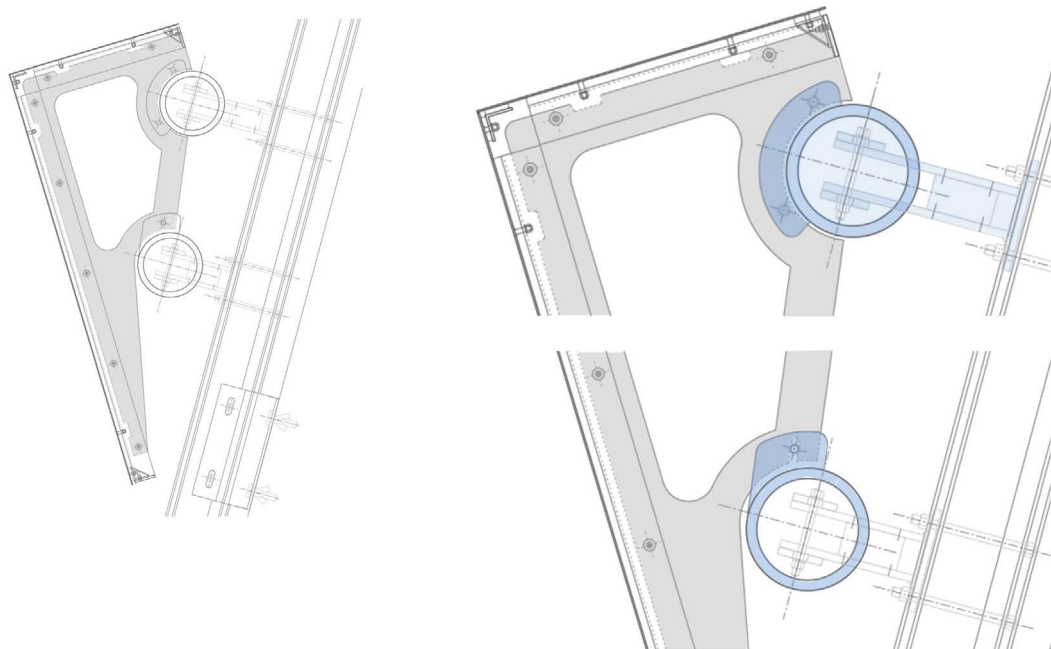


Figura 22. Esquemas gráficos de la solución de fijación de las cuadernas a los largueros a través de coronas y fijaciones atornilladas.

La chapa ha de fijarse sin ningún elemento visible desde el exterior y permitiendo la libre dilatación para evitar tensiones térmicas en las fijaciones o en la misma chapa. Durante la fase de diseño se estudiaron varias soluciones, encontrándose como la ideal una combinación entre pernos de acero inoxidable electrosoldados y unos bastidores de aluminio fijados con silicona estructural. La silicona estructural permitía fijar la chapa a las cuadernas asumiendo el giro relativo entre la superficie de la chapa y las cuadernas, mientras que los pernos aportaban un posicionamiento inicial de la chapa durante el montaje, y una redundancia estructural del sistema en caso de fallo de adherencia de la silicona.

La directriz curva de la envolvente exterior de las lamás se decide simplificar en una serie de componentes estructu-

rales planos y tubos de directriz recta aprovechándose de la capacidad de giro que le otorga el sistema de fijación de la chapa a las cuadernas. De esta forma se pueden fabricar de forma directa desde el modelo digital tanto los “largueros” que conforman el componente principal estructural de las lamás, como las “cuadernas” que le otorgan la geometría final a la chapa de acero. Dado que cada lama cuenta con una geometría distinta, cada cuaderna y cada larguero que fija las cuadernas deben ser parametrizadas de forma que puedan ser, generadas automáticamente sus planos de corte y posteriormente exportada su información según los procesos de fabricación.

El control de la geometría exterior mediante cuadernas no consigue dotar a la chapa de uniformidad geométrica

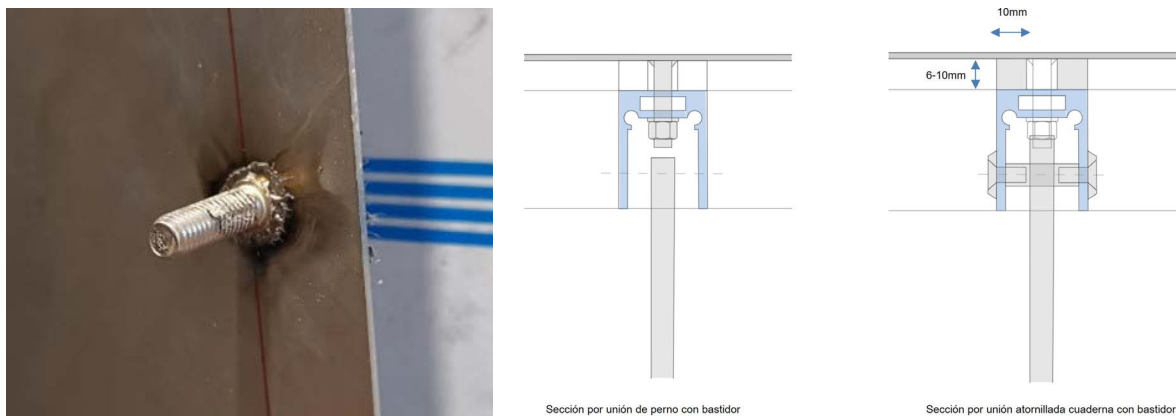


Figura 23. Esquemas gráficos de la solución de fijación de la chapa de acero inoxidable a las cuadernas y una imagen de una muestra de perno electrosoldado.

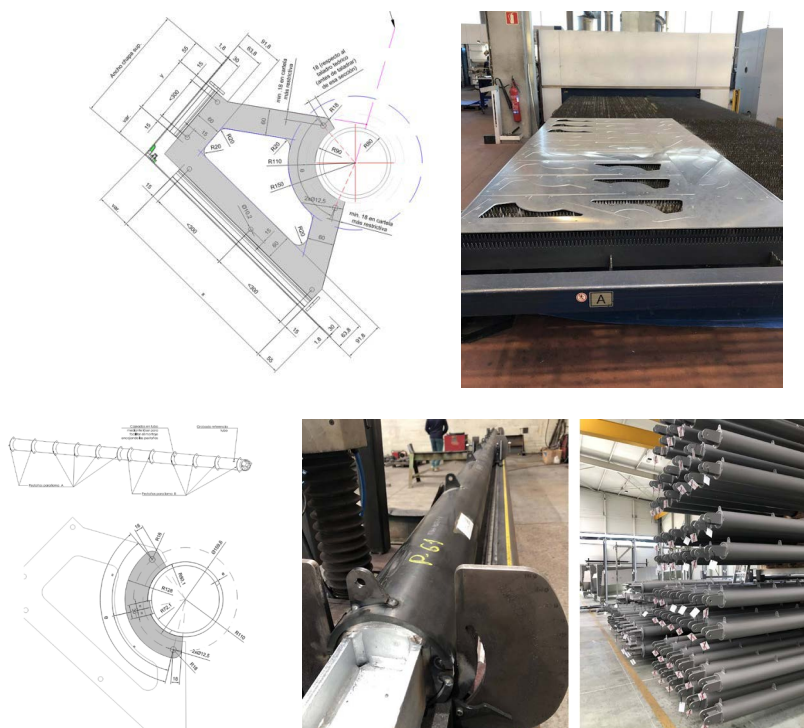


Figura 24. Fotografías y planos de la definición geométrica parametrizada de las cuadernas y largueros y el proceso de fabricación de los mismos.

completa, por lo que se encuentra necesario disponer de elementos de rigidización de los bordes libres superior e inferior de cada chapa. Estructuralmente tiene una función de rigidizar ese borde evitando abolladuras por cargas de viento, y constructivamente consigue controlar la geometría de la lama dentro las estrictas tolerancias fijadas para que, una vez instaladas en obra, las juntas entre ellas mantengan los 20mm fijados de forma uniforme en toda su longitud.

La definición de un proceso constructivo novedoso para dotar a una chapa de acero de 1,8mm de espesor de doble curvatura demandaba la realización de numerosas pruebas de fabricación a distintas escalas para poder verificar la precisión geométrica que se alcanzaba y también la calidad en cuanto a continuidad del material.

El material elegido para la nueva envolvente, es acero inoxidable con un tratamiento superficial de grabado tipo

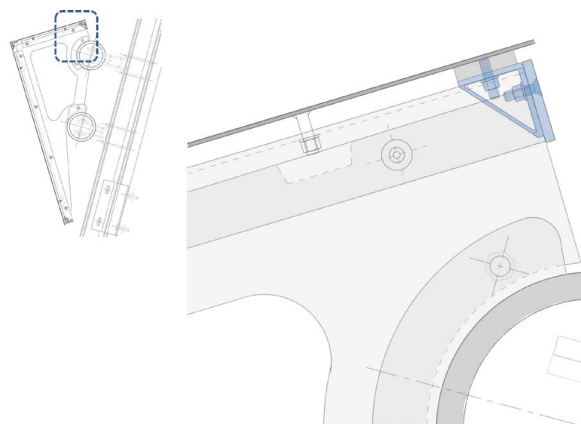


Figura 25. Sistema constructivo para la rigidización del borde libre de la chapa de acero inoxidable.

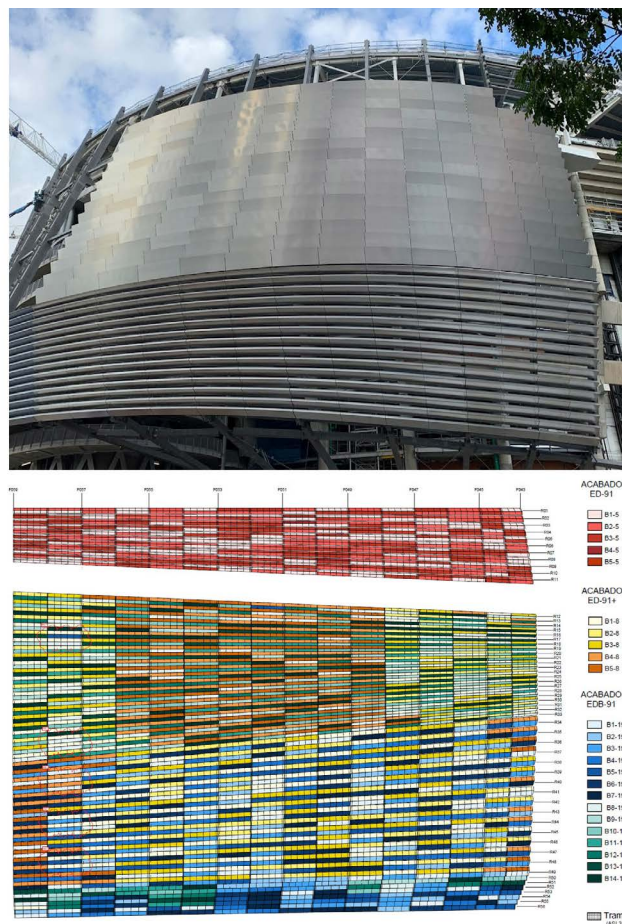
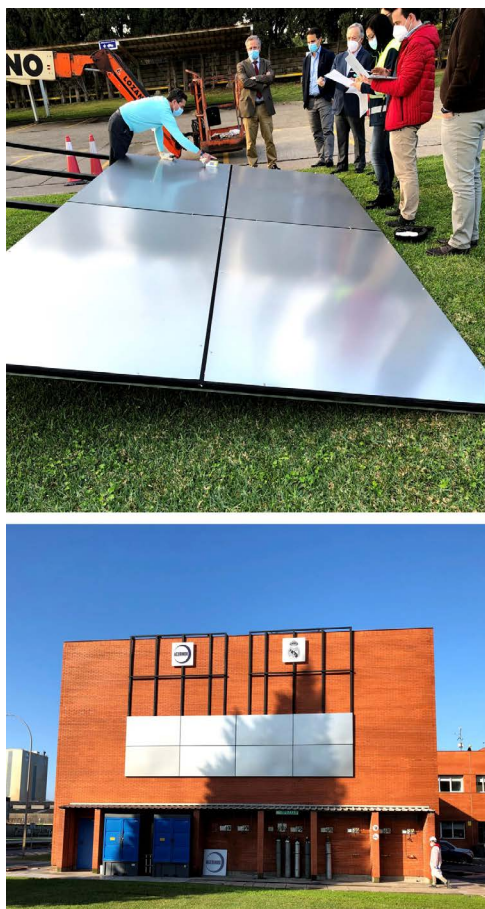


Figura 26. Fotografías de las muestras visuales para determinar límites admisibles de desviación y ejemplo de dibujos y solución instalada de la aplicación de aleatoriedad de lotes en la fachada.

“emboss lino”. Este material permite reflejar la luz de su entorno, aportando una imagen dinámica y cambiante con las condiciones exteriores. No obstante, este material tiene aparejada una limitación técnica en cuanto a la uniformidad de color y brillo que se puede obtener de distintas coladas. Para evitar que se pudieran percibir zonas asociadas a los lotes de fabricación, se realizó una distribución mezclada de lotes y se limitó conjuntamente con el fabricante la desviación máxima del brillo y color.

Para poder visualizar la planimetría y el efecto a escala real de la envolvente se define y construye una muestra a escala, donde se podrá visualizar la máxima calidad geométrica y visual que se puede alcanzar en la obra. Todo ello después de varias iteraciones con los fabricantes del acero inoxidable y los subcontratistas.

La validación de esta muestra supuso el hito necesario para validar el diseño constructivo, y también los procesos de fabricación asociados al mismo.

Al definirse un sistema constructivo nuevo que debía de ser posible su fabricación por varios Industriales, las muestras visuales se realizaron con tres distintos industriales para verificar que el sistema era estandarizable y podría ser fabricado sin diferencia por cada uno de ellos.

El Proyecto incorporó lo aprendido durante la ejecución de estas muestras, y estas muestras también sirvieron para que tanto el equipo de Arquitectos responsables del concepto,

como el cliente aceptaran el sistema constructivo empleado. Las ligeras deformaciones inducidas por el propio proceso de curvado en frío del material, resultaron aceptables ante distintos ambientes de luz y posiciones observadas. Arup verificó la geometría de cada una terminada, viéndose que se podían alcanzar los altos requerimientos especificados en el Proyecto en cuanto a desviaciones y tolerancias de fabricación.

2.3. Criterios de modelización y cálculo

Como ya se ha mencionado anteriormente la complejidad de la envolvente que se compone de más de 13.000 lamas cada una de ellas con una geométrica distinta, representó un verdadero reto de cara a su validación estructural.

2.4. Descripción del sistema y componentes

La justificación del sistema de lamas requirió la justificación del conjunto y de cada uno de sus componentes por separado.

1. Palas – Chapas de acero inoxidable.
2. Bastidor auxiliar para la unión de las palas a las cuadernas, se realiza mediante una combinación de unión mixta de adhesivo (silicona estructural) y mecánica (pernos electrosoldados).
3. Unión del bastidor auxiliar a las cuadernas.
4. Cuadernas de aluminio.

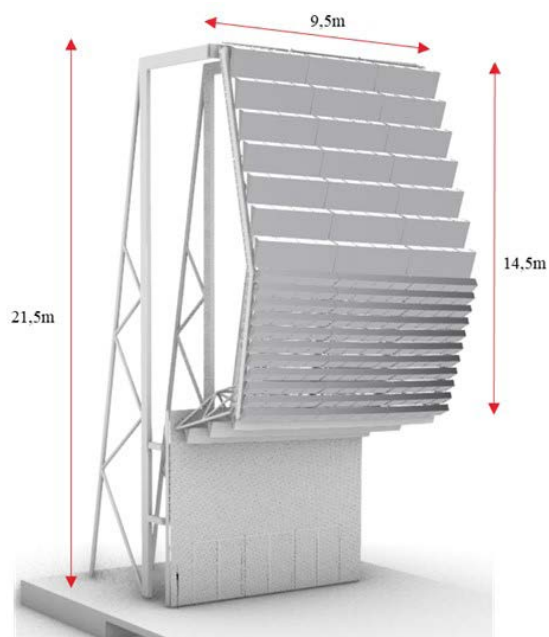


Figura 27. Imagen del modelo 3D generado para fabricar la muestra a escala y fotografía de la muestra.



Figura 28. Fotografías de las muestras fabricadas para verificar la planimetría alcanzable por el sistema constructivo y método de fabricación digital previsto.

- Unión de las cuadernas a los largueros de soporte (Coronas en los tubos de acero de sección circular).
- Largueros de soporte (Tubos de acero de sección circular).
- Anclajes de los largueros a la subestructura de acero para soporte de la fachada.

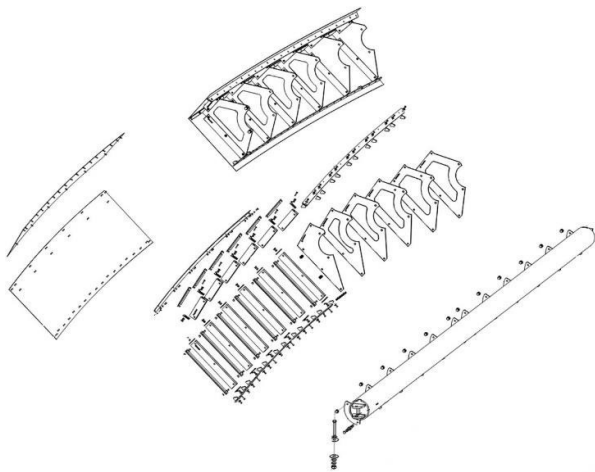


Figura 29. Esquema de componentes estructurales de una lama de fachada.

2.5. Parametrización para generar una envolvente racionalizada de casos extremos.

Con el objeto de realizar la validación estructural de toda la envolvente se realizó una parametrización de las lamas para identificar los casos más desfavorables y representativos de la fachada. Mediante la parametrización se redujo drásticamente el número de casos a analizar, permitiendo una validación rigurosa, detallada y eficiente de los casos extremos según los criterios definidos a continuación. Para identificar los casos extremos a analizar dentro de cada una de las tipologías definidas anteriormente se tomaron en consideración los siguientes parámetros:

- Longitud entre apoyos, se realizó una discretización de los casos más desfavorables según la longitud entre apoyos que tiene que salvar los largueros.
- Envergadura de las palas: la envergadura se refiere a la longitud total de la suma de las palas de cada lama. Este factor es crítico pues a mayor longitud de palas mayor superficie de carga de viento que genera un arrastre sobre los largueros. Este parámetro resultó ser tan crítico que se desarrolló un script paramétrico para definir de forma automática que lamas requerían uno o dos largueros para funcionar estructuralmente.
- Orientación de las lamas: el ángulo de inclinación o desplome respecto a la vertical influye en el reparto de las solicitaciones verticales y horizontales sobre los largueros.
- Curvatura: se realizaron comprobaciones de las lamas con mayor curvatura para analizar el efecto de la curvatura en el comportamiento global.

Combinando los parámetros anteriores se realizó una envolvente racionalizada de casos extremos para cada tipología de lama, cuyo proceso de cálculo y validación se explica a continuación.

2.6. Modelo de elementos finitos (FEM)

Para la validación se realizó un modelo global de cálculo utilizando el software de cálculo estructural mediante elementos finitos Strand7. Este modelo incluye las palas, bastidores, cuadernas y largueros, y permite analizar el comportamiento conjunto de la lama bajo diferentes combinaciones de carga. Las palas, cuadernas y bastidores se modelaron con elementos 2D tipo “plates”, los largueros mediante elementos 1D tipo viga, las uniones con silicona estructural mediante muelles y las uniones de los pernos mediante elementos 1D tipo viga. Las comprobaciones del modelo global que tienen en cuenta el comportamiento del conjunto del sistema (palas, cuadernos y larguero), permitieron evaluar la compresión

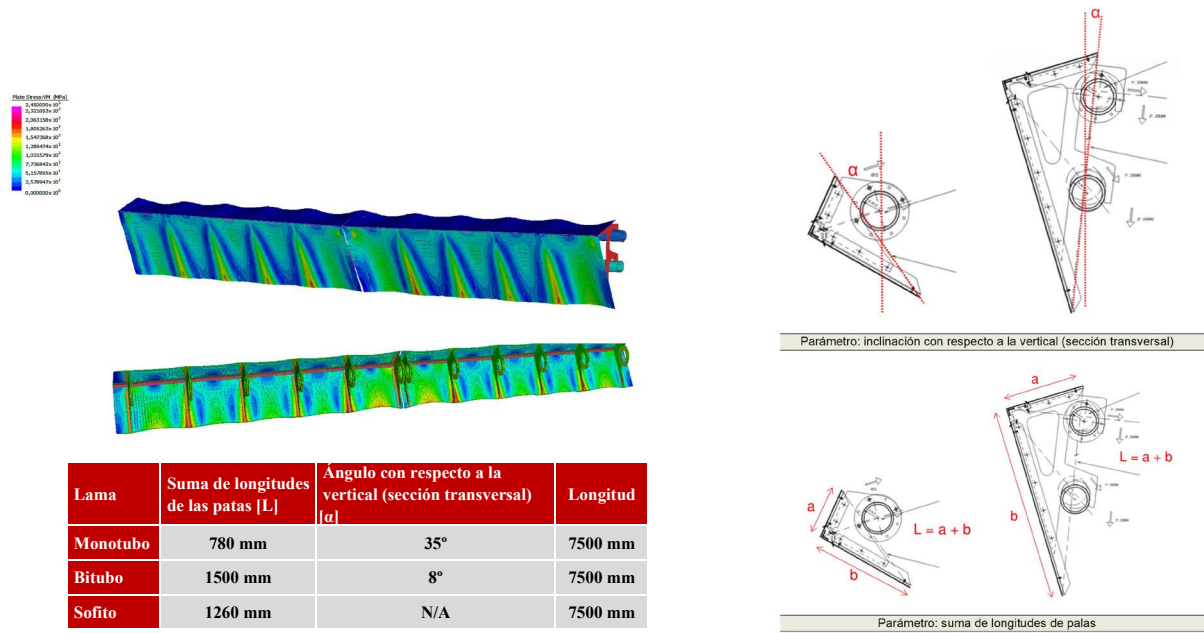


Figura 30. Parámetros considerados para seleccionar la envolvente racionalizada de casos extremos.

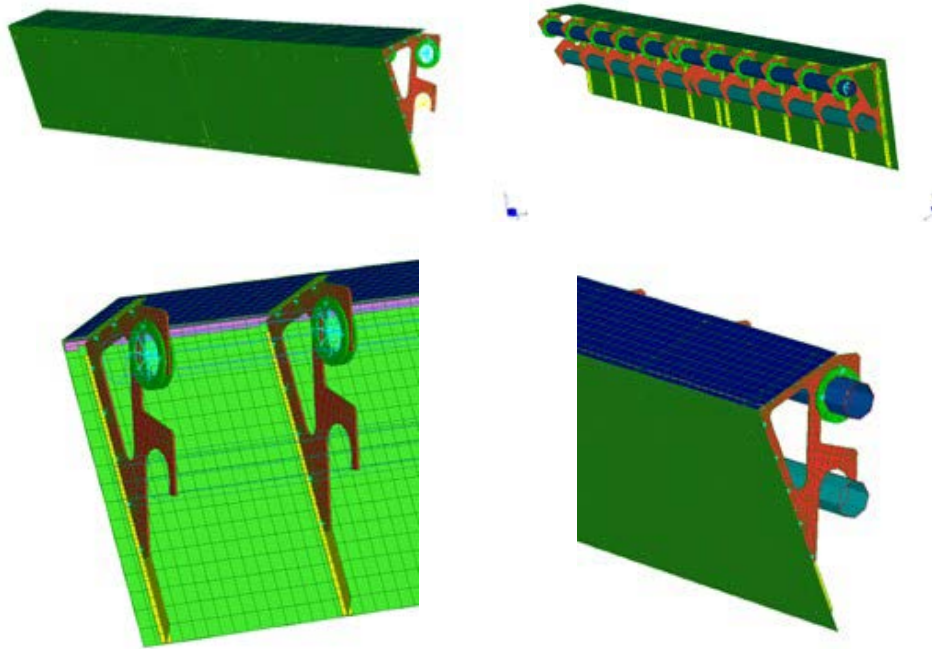


Figura 31. Vistas generales y de detalle de los modelos de elementos finitos.

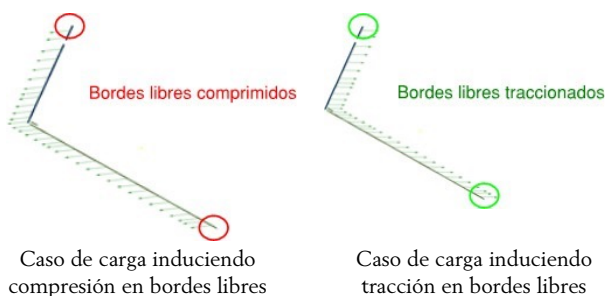
que se produce en el plano de las chapas a consecuencia del arrastre que produce la flexión de los largueros en las palas, es decir que las lamas contribuyen a la rigidez del larguero. Además, el modelo global se utilizó para extraer las reacciones utilizadas en la validación de las uniones (silicona estructural y pernos electrosoldados).

2.7. Criterios de cálculo y Validación

El primer paso fue la validación de la chapa de acero inoxidable atendiendo a los siguientes criterios:

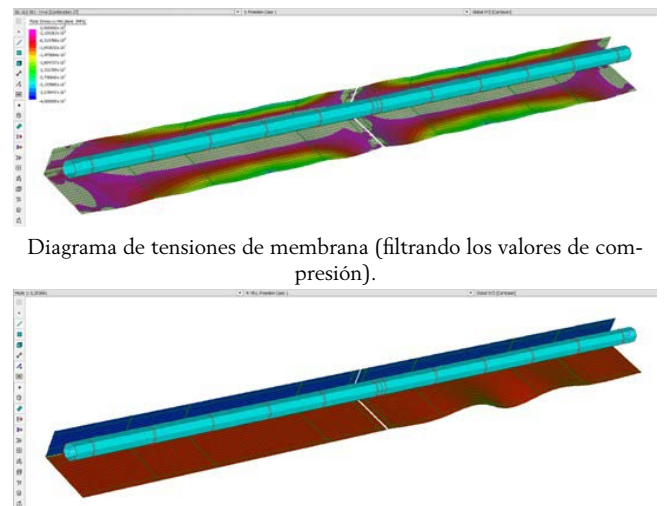
- Resistencia: evaluación usando tensiones combinadas de Von Mises (VM) menores que el límite elástico del acero inoxidable.
- Estabilidad: evaluación de riesgo de abolladura.

El modelo global se utilizó para evaluar tensiones máximas de membrana (compresión) que inducen compresiones en los bordes libres de la chapa, generalmente debido a las cargas de succión (carga alejándose de la lama hacia el exterior del edificio).



Para evaluar el riesgo de abolladura se realizó un análisis lineal (LBA: linear buckling Analysis en Strand 7). Nótese que a raíz de este análisis y debido al reducido espesor de la cha-

pa, a que la esbeltez a lo largo de los bordes libres es alta y la abolladura se puede producir bajo tensiones de membrana de magnitud muy reducida (por debajo de 10MPa), fue necesario rigidizar los bordes libres de las palas, incorporando un rigidizador lineal a lo largo de los bordes libres de las palas.



pa, a que la esbeltez a lo largo de los bordes libres es alta y la abolladura se puede producir bajo tensiones de membrana de magnitud muy reducida (por debajo de 10MPa), fue necesario rigidizar los bordes libres de las palas, incorporando un rigidizador lineal a lo largo de los bordes libres de las palas.

Figura 32. Resultados de cálculo.

La introducción del perfil de rigidización longitudinal cambia la distribución tensional, que ahora se asemeja a la correspondiente a una chapa rectangular con los cuatro bordes rigidizados.

La diferencia principal no es la reducción en la magnitud de las tensiones, sino que éstas se desplazan hacia el interior del cuadrado formado por el vértice entre palas, las cuadernas

en los laterales y el borde exterior rigidizado, y -especialmente- el hecho de que las condiciones de contorno del borde exterior cambian de cara al análisis de abolladura, pasando a ser un borde rigidizado.

Este nuevo estado tensional da lugar a un factor crítico de carga negativo en los primeros modos de deformación, lo que indica que el problema de abolladura ha sido resuelto por el rigidizador longitudinal.

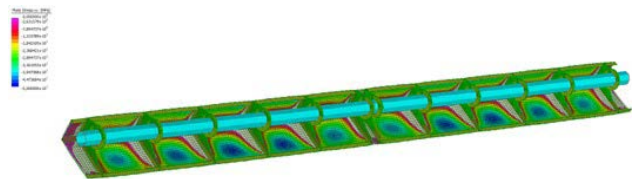
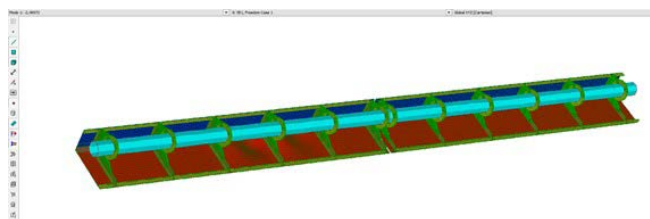


Diagrama de tensiones de membrana (filtrando los valores de compresión).



Análisis lineal de abolladura - VB1.

Factor crítico de carga: -2,5

Figura 33. Resultados de cálculo

2.8. Validación de la fijación de las palas a las cuadernas

Como se ha comentado anteriormente la chapa se fija mediante un bastidor a las cuadernas mediante una configuración mixta de unión de Silicona estructural y, para dar redundancia a la fijación, fijar la chapa hasta el curado final de la silicona y contribuir a resistir el peso propio de la lama se soldarán pernos tipo Stud Weld M5.

Siguiendo las recomendaciones de los fabricantes, se modelaron los cordones de sellado como muelles dentro del modelo global de elementos finitos. Esta aproximación mediante modelos de cálculo avanzado tipo FEM permitió diseñar la silicona con un factor de seguridad (Fos) de 4 frente al Fos de 6 que requiere la ETAG002, utilizando el procedimiento y los valores (propiedades del material y tensiones admisibles) recomendados por los fabricantes para realizar la simulación FEM.

Para la validación de los cordones de silicona estructural de la lama se siguió el procedimiento y los valores del producto SG500 de la casa comercial SIKA, que recomienda la utilización de los siguientes valores:

Product	Elastic modulus E [MPa]	Shear Modulus G [MPa]
Sikasil® SG-500	3.6	1.2

La modelización de los muelles permitió evaluar la distribución de cargas y las tensiones dentro del cordón de sellado, se

calcularon las constantes de rigidez de los muelles a cortante y tracción utilizando las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} K_{tracción} &= E_{muelle} * \frac{Ai}{t} \\ K_{cortante} &= G_{muelle} * \frac{Ai}{t} \end{aligned}$$

En la tabla expuesta a continuación se muestran la rigidez de los elementos utilizados en el modelo de FEM:

Cordón	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Largo* [mm]	Ks1 [N/mm]	Ks2 [N/mm]	Kt [N/mm]
Pala superior	10	30	25	90	90	270
Pala inferior	10	30	29	104	104	313
Perfil de borde	6	18	30	180	180	540

*Espaciado de los elementos tipo muelle en el modelo de FEM

Puesto que las cargas incluyen el efecto del viento se consideraron los valores de tensiones admisibles de la silicona estructural bajo efectos dinámicos facilitados por Sika. Siendo estos:

$$\begin{aligned} s_{Rd} &= 0,21 \text{ MPa} \\ t_{Rd} &= 0,157 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Para cada uno de los elementos y combinación de cargas se comprobó que las tensiones de tracción y las de cortante de cada uno de los elementos están por debajo de los límites recomendados por Sika; además también se comprobó la interacción cortante/axil según la siguiente expresión basada en "Lame's stress ellipsoid theory":

$$U = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{rd}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{rd}} \right)^2 \leq 1,0$$

La configuración mixta de unión de completa con unos pernos electrosoldados, de métrica M5 y calidad A4/70, para el cual se realizaron las siguientes comprobaciones complementarias:

- **Resistencia en servicio:** pernos sometidos a las reacciones del modelo de análisis, bajo las combinaciones de diseño. Las reacciones se reparten entre el cordón de silicona y los pernos electrosoldados en función de sus rigideces relativas.
- **Resistencia bajo combinación accidental:** pernos sometidos a las reacciones del modelo de análisis, despreciando el cordón de silicona y bajo combinación de cargas accidental (carga de viento sin mayorar).

Para la validación de las lamas de aluminio, se utilizaron criterios de resistencia basados en el modelo de elementos finitos (FEM) previamente descrito. Las uniones de las cuadernas a los largueros de soporte se validaron según la formulación estándar de los códigos EC9 y EC3 para uniones atornilladas en elementos de aluminio o acero, respectivamente, permitiendo ajustar la posición de la unión mediante taladros. En cuanto a los largueros de soporte, se comprobaron tanto criterios de deformación como de resistencia, siendo la rigidez el criterio limitante para evitar deformaciones excesivas que podrían inducir tensiones no admisibles en otros componentes. Esta rigidez se verificó mediante el estudio de la frecuencia natural del conjunto utilizando el modelo completo de FEM.

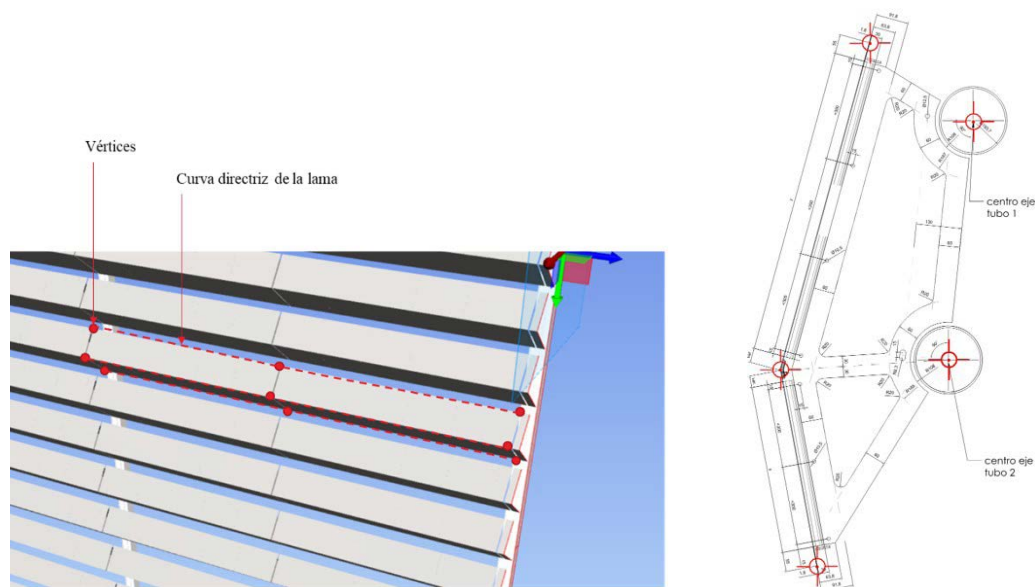


Figura 34. Imágenes del modelo con los puntos geométricos que definen la geometría básica de parametrización de cualquier lama.

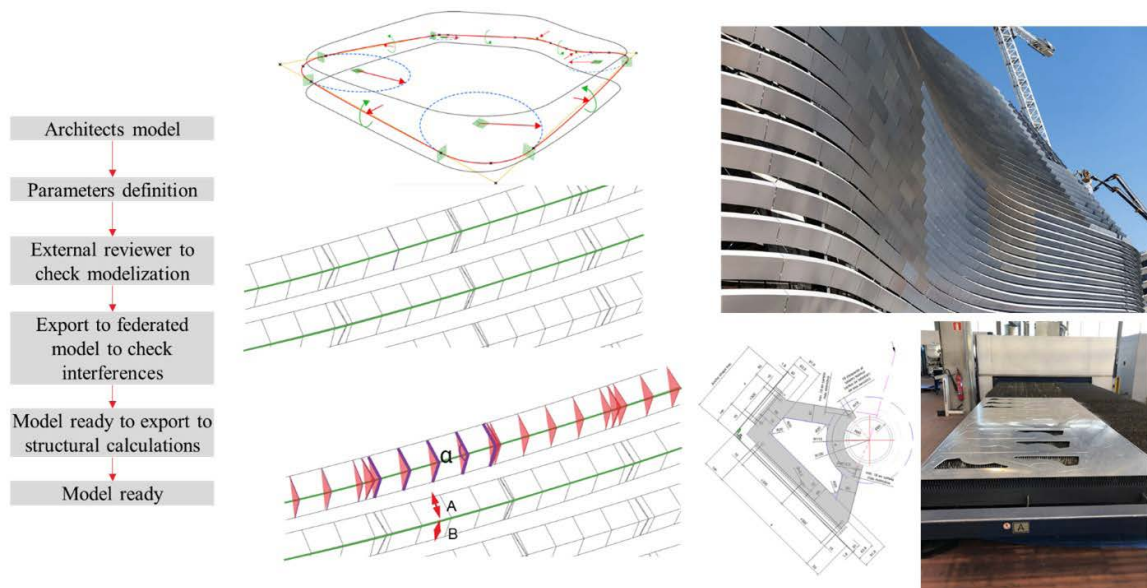


Figura 35. Proceso de exportación de la información geométrica desde diseño a fábrica.

Se mantuvo el diámetro exterior de los tubos de acero de sección circular y se especificó el espesor del tubo en función del tamaño de las palas, la longitud del tubo, el ángulo de la lama, y si era monotubo o bitubo. Finalmente, se limitó la frecuencia natural del conjunto a 5 Hz para evitar fenómenos aeroleásticos que pudieran inducir en fallos estructurales de cualquiera de los componentes de las lamas.

2.9. Etapa de Fabricación

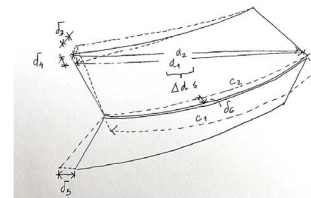
2.9.1. Proceso de Exportación de la Información:

Arup, como diseñador y generador de la geometría base para la fabricación, debe establecer un sistema de exportación. El objetivo es garantizar que no se pierda información durante el proceso de transferencia de datos. En cualquier proyecto que incluya un proceso de Diseño para Fabricación digital,

se debe establecer un criterio de responsabilidades basado en quien genera la información base, quien la desarrolla y desglosa en los distintos procesos de fabricación y quien la ensambla. En el caso del Estadio Santiago Bernabéu, Arup debe asegurarse de que los datos exportados mantengan la integridad y precisión de la geometría original. Esto implica considerar formatos de archivo, unidades de medida y cualquier transformación necesaria.

2.9.2. Revisión del Proceso de Exportación:

La coherencia con el modelo general es crucial para garantizar que cada proceso de fabricación de las lamas se realice de manera precisa y consistente. Esto asegura que, al ensamblar las lamas, se mantenga la geometría definida inicialmente. Además, la revisión de la integridad del producto final es esencial para garantizar que no haya discrepancias entre los



Parámetro geométrico	Código	Desviación máxima admisible
Desviación en diagonal superior	d2-d1	±0.3mm
Desviación fuera de la superficie	d3	±0.2mm
Desviación de ancho	d4	±0.2mm
Desviación de longitud	d5	±0.2mm
Desviación de longitud de cuenta en la arista (curvatura lama)	d6 (C1-C2)	±0.2mm

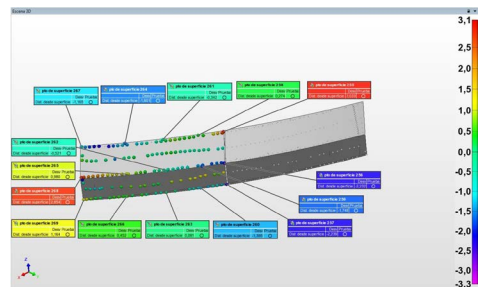


Figura 36. Fotografía, límites admisibles y resultados del proceso de escaneo de una lama ya fabricada.

datos exportados y el diseño original. Esto ayuda a evitar errores y garantiza que el producto final sea de alta calidad y cumpla con los requisitos del diseño. En general, estas medidas de control de calidad son esenciales para asegurar que el producto final sea consistente, preciso y de alta calidad.

2.9.3. Verificación del Producto Final mediante Escaneo 3D:

La inspección post-fabricación que se realiza mediante el escaneo 3D es una herramienta crucial para garantizar que las lamas ensambladas cumplan con las especificaciones requeridas. Al comparar la geometría real con la definida en el modelo, se puede confirmar la precisión y calidad de la fabricación. Además, este escaneo permite detectar cualquier desviación y asegurar que la lama cumpla con las expectativas establecidas. Si la lama es considerada apta para su uso, se puede tener la confianza de que se ha llevado a cabo un proceso de fabricación de alta calidad y que se cumplen los requisitos necesarios para su puesta en obra. La fiabilidad de la fabricación digital se controlaba mediante el escaneo 3D de cada lama una vez ensamblada, admitiéndose únicamente 3mm de desviación en cualquiera de los puntos.

En resumen, este proceso combina diseño, parametrización, cálculos y verificación para lograr lamas consistentes y precisas. La colaboración entre Arup y los fabricantes es fundamental para garantizar un producto final de alta calidad.

3. CONCLUSIÓN:

Con la llegada de la fabricación digital y la gran evolución en el campo del software aplicado al diseño de superficies complejas, la relación entre el diseño y la construcción de envolventes arquitectónicas ha cambiado significativamente.

Los arquitectos ahora pueden utilizar software de diseño paramétrico para crear modelos tridimensionales precisos de la envolvente, lo que permite una mayor precisión y eficiencia en el diseño y la fabricación.

La fabricación digital también ha permitido la utilización de técnicas de fabricación avanzadas, como la impresión 3D, el corte por láser o la fresadora CNC, que permiten la producción de piezas completas y precisas con rapidez y eficiencia.

El diseño y validación estructural de la envolvente del estadio, compuesta por más de 13,000 lamas con geometrías únicas, representó un desafío significativo. Cada componente del sistema, desde las palas de acero inoxidable hasta los largueros de soporte, fue justificado individualmente. La unión de las palas a las cuerdas se realizó mediante una combinación de adhesivo estructural y pernos electrosoldados, asegurando la estabilidad y resistencia del conjunto. La parametrización de las lamas permitió identificar y analizar los casos más desfavorables, optimizando el proceso de validación estructural.

En cuanto a la definición del sistema constructivo, la evolución experimentada en las últimas décadas del proceso de diseño para fabricación digital ha permitido fabricar elementos de alta complejidad geométrica y singularidad con la eficiencia, precisión y calidad que requería una obra como la nueva piel del Estadio Santiago Bernabéu. Tal y como se ha demostrado, la escala ya no es un problema para utilizar estos procesos, pudiendo ser aplicados en paralelo por distintos fabricantes siempre que exista un procedimiento robusto que asegure la transferencia de datos entre plataformas.

Referencias:

- [1] De Francisco, E. (2016). "Fabricación digital de envolventes panelizables en arquitectura de geometría compleja"

- [2] Candela, F., Moneo, J. R. (2019). "El escándalo de la ópera de Sidney". Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- [3] ABB Architects., Franken, B. (2008). "Transparent Plastics." Birkhäuser Basel. 40-41. Gehry, F. (1999-2003). Walt Disney Concert Hall. De: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/walt-disney-concert-hall/>
- [4] Castro, G., Esteves, L. P. (2005). "Novos processos de construção". Revista Arquitectura&Vida, n.58.
- [5] Orzel, B., Wolniak, R. (2022). "Digitalization in the Design Industry - Remote Work in the Context of Sustainability: A Study from Poland". Department of Economics and Informatics, Faculty of Organization and Management, Silesian University of Technology, 41-800 Zabrze, Poland.
- [6] Chang, L. (2015). "The Software Behind Frank Gehry's Geometrically Complex Architecture". Priceonomics. De: <https://priceonomics.com/the-software-behind-frank-gehrys-geometrically/>
- [7] Museo Guggenheim Bilbao. "A structure of Titanium, Glass and Limestone". The Construction. De: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building/the-construction>