

# DESARROLLO DEL PROYECTO Y EJECUCIÓN DE LAS FACHADAS DEL MUSEO GUGGENHEIM BILBAO. BILBAO/ESPAÑA(\*)

(DEVELOPMENT OF THE PROJECT AND EXECUTION OF THE FAÇADES OF THE GUGGENHEIM BILBAO MUSEUM. BILBAO/SPAIN)

José Emilio Galíndez Maurenza, Ingeniero Industrial

Fecha de recepción: 8-X-97

ESPAÑA

142-158

## RESUMEN

*En esta comunicación se describe, pormenorizadamente, el proceso seguido en el proyecto y la ejecución de las fachadas ciegas y acristaladas del Museo Guggenheim Bilbao. Se exponen los problemas que surgieron para resolver la singular envoltura de los nueve módulos que componen el edificio y cuáles fueron las soluciones adoptadas.*

## SUMMARY

*This paper describes in detail the project process and the execution of the façades, blind and of glass, of the Guggenheim Bilbao Museum; also the problems that have been overcome to achieve the unique revetment of the nine modules of the building, and the solutions that were adopted.*

El desarrollo del proyecto de las fachadas del Museo Guggenheim de Bilbao se dividió en dos fases claramente diferenciadas: el pre-proyecto y el proyecto propiamente dicho.

En la fase de pre-proyecto, cuyo fin primordial era el de participar en el concurso de adjudicación, se determinaron las características generales de los elementos que entrarían a formar parte en el proyecto que se presentaba, de acuerdo con unas especificaciones que deberían reunir los materiales que constituyeran tanto las fachadas ciegas como las acristaladas.

Estas especificaciones se referían fundamentalmente a:

Carga de viento de diseño establecida en 250 kg/cm<sup>2</sup>.

Flèche máxima admisible de los elementos de las fachadas ciegas, inferior a 1/175 ó 20 mm, y de los muros cortina, inferior a 1/300 ó 10 mm.

Las tensiones no deberían exceder de los valores establecidos en las normas de referencia y se fijaban unos valores de aislamiento térmico y atenuación acústica que deberían cumplirse tanto en las fachadas ciegas como en las acristaladas. Se especificaba, además, que la documentación para la ejecución del proyecto se realizaría a través de ficheros CATIA, lo que suponía un cierto reto para la empresa.

Mientras que se avanzaba en el pre-proyecto, determinando las dimensiones de los elementos metálicos para cumplir los requisitos mecánicos y estudiando los materiales existentes en el mercado que cumplieran con las exigencias físicas requeridas, se estableció contacto con la empresa IBM para negociar la adquisición de una estación de hardware y software, así como el adiestramiento del personal necesario para llevar a efecto el proyecto, en caso de que se adjudicara a la empresa.

Tras numerosas reuniones con el estudio de Frank O. Gehry y Asociados que diseñaba el proyecto desde EE. UU., e IDOM, empresa encargada del proyecto de ejecución y de la dirección de la obra, en las que se analizaron y estudiaron los argumentos que se alegaban para defender el proyecto

(\*) El presente artículo ha sido elaborado a partir de la conferencia que D. José Emilio Galíndez pronunció en el Instituto Eduardo Torroja el 24 de abril de 1997.

de las fachadas en su conjunto, detalles y materiales, así como la capacidad técnica y económica de la empresa para afrontar tan difícil reto, fue adjudicado el desarrollo y ejecución del mismo a UMARAN.

En la fase de proyecto es en la que se produce el verdadero desarrollo del mismo. A las especificaciones de proyecto definidas con anterioridad, se añade la definición de las características de los modelos a realizar a tamaño natural y extraídos de zonas definidas de la obra, que servirían para ser sometidos a ensayo y como modelo visual. Uno sería de fachada metálica ciega y el otro de zona acristalada de muro cortina.

Los ensayos a los que se someterían ambos modelos serían:

- Infiltración de aire, según norma ASTM E283, con una diferencia de presión de 300 Pa y unas fugas admisibles menores a  $1,08 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ .

- Estanquidad al agua, según norma ASTM E331, con diferencia de presión estática de 500 Pa, durante 15 minutos, sin producirse infiltración.

- Estanquidad al agua, según norma AAMA 501.1, con diferencia de presión dinámica de 560 Pa, equivalente a una velocidad de viento de 110 km/h y generado por un motor de aviación de 2 m de longitud de hélice, durante 15 minutos.

- Ensayos estructurales, según norma ASTM E330, con cargas sucesivas del 50% y 100% de presión y succión durante 10 s, sin que se produzcan flechas superiores a  $1/175$  y  $1/300$ , según se trate de fachada ciega o acristalada, y cargas suplementarias del 75% y 150% sucesivas en presión y succión, sin fallos ni deformaciones permanentes mayores de  $1/1.000$ .

Sobre el edificio acabado se realizaría un ensayo de estanquidad al agua, según norma AAMA 501.3, con idénticas cargas y mantenimiento que la norma ASTM E331. También se debería realizar un ensayo de los paneles de revestimiento metálico, sobre 6 unidades de chapa de titanio ensambladas entre sí en sus cuatro lados, según el proyecto, y con sus grapas de anclaje correspondientes. Se someterían a escalones de presión ascendentes cada 500 Pa y hacia el exterior de la fachada.

Por último, los anclajes o *tie-backs*, instalados, tanto en las fachadas ciegas como en las acristaladas y que servirían de cuelgue de los elementos para la limpieza exterior de las mismas, deberían someterse a un ensayo de tracción con carga de 300 kg y a otro de carga lateral también de 300 kg, sin fallo ni deformación permanentes.

Se especificaba que el acabado de los elementos resistentes de fachadas ciegas y acristaladas debía ser de galvanizado

en caliente y la tornillería, de acero inoxidable o con tratamiento orgánico con una resistencia en cámara de niebla salina superior a 500 h. Las chapas de acero sobre los montantes serían laminadas de 2 mm de espesor, con tratamiento de galvanizado en continuo de  $Z-275 \text{ gr}/\text{m}^2$  de zinc.

Por otro lado, la membrana impermeabilizante debería ser autocicatrizante.

El aislamiento térmico debía conseguirse con un producto que fuera provisto de su correspondiente barrera para vapor y, además, evitara las condensaciones intersticiales.

Tanto los remates entre edificios y muros cortina, como los canalones, junquillos y embellecedores, serían de acero inoxidable AISI 316, con acabado superficial 2D.

El recubrimiento exterior estaría constituido por paneles de chapa de titanio de 0,4 mm de espesor y medida general de 1.150 mm de ancho por 650 mm de alto, engatilladas en sus cuatro lados y sujetas mediante grapas de anclaje de acero inoxidable AISI 300. La aleación de titanio debería cumplir con la norma ASTM B265 Gr1.

Los acristalamientos, tanto de muros cortina y de ventanas salientes, como de lucernarios, deberían cumplir determinadas condiciones: transmisión térmica, atenuación acústica, transmisión de rayos UV, luminosidad, y resistencia mecánica, según las zonas en que fueran ubicados.

Los materiales de sellado deberían ser compatibles con los materiales con los que iban a entrar en contacto.

Hay que decir que los ensayos realizados sobre los modelos resultaron favorables y aportaron provechosas enseñanzas, lo mismo que el análisis de los modelos visuales, localizados a pie de obra.

## PROYECTO DE FACHADAS CIEGAS Y MUROS CORTINA

### CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS RESISTENTES QUE COMPONEN LAS FACHADAS CIEGAS: MONTANTES, *LADDERS* Y TRAVIASAS

Previamente al cálculo de los elementos resistentes de las fachadas ciegas mediante el empleo del Método de Elementos Finitos (MEF), y dado que un alto porcentaje de montantes y *ladders* describen líneas curvas, se desarrolló un cálculo comparativo para determinar los condicionantes que debían cumplir, tanto los apoyos como las conexiones, para poder asimilar el cálculo lineal de una viga curva con el de una viga recta.

Para ello se realizaron cálculos comparativos de tensiones, deformaciones y reacciones longitudinales con las consi-

deraciones de viga recta, viga curva con desplazamientos impedidos y viga curva con desplazamiento longitudinal libre y con distintos radios de curvatura y se comprobó la similitud de resultados entre los estados primero y tercero.

Igualmente, dado que el cálculo de montante, *ladder* y travesía se iba a hacer de forma independiente, se consideró adecuado estudiar cuál era la rigidez de las uniones entre estos elementos, de forma que los apoyos no fueran simplemente empotramientos o articulaciones, sino que se comportasen como articulaciones con cierta rigidez al giro.

### 1. Cálculo del montante por el Método de Elementos Finitos (MEF)

Los montantes son perfiles de sección en forma de  $\square$  de  $90 \times 50 \times 22 \times 2$  mm que se apoyan en los *ladders* soportando las chapas de titanio, el impermeabilizante y la chapa galvanizada. Debido a las distancias entre *ladders* tiene longitudes variables y puede tener 2, 3 ó 4 apoyos.

Se consideró como carga única la acción del viento de  $250 \text{ kg/m}^2$  ó  $150 \text{ kg/ml}$  y una separación entre montantes de 600 mm. Se despreció el efecto peso ( $16 \text{ kg/m}$ ).

El enchufe entre los montantes permite desplazamientos longitudinales. Además, la unión entre *ladders* y montantes se realiza a través de un material flexible, poco rígido. Por lo tanto, se supone que no tienen ningún impedimento para deformarse longitudinalmente, es decir, las reacciones longitudinales son nulas.

### 2. Cálculo del *ladder* por el MEF

El *ladder* es un tubo de  $50 \times 3$  mm que soporta los montantes y se apoya en las travesías y tiene una longitud aproximada de 6 m.

Sobre los *ladders* actúan dos tipos de cargas: las reacciones resultantes del cálculo del montante y el peso de los montantes, con todo lo que en ellos se apoya. Estas cargas se traducen en un tren de cargas puntuales cada 600 mm, con posición variable respecto a los apoyos.

Las deformaciones, tensiones máximas y las reacciones en sentido longitudinal y vertical se calcularon considerándolos una viga recta, ya que los apoyos son las travesías -que admiten deformación- y la conexión entre ellos permiten deformaciones longitudinales libres.

La reacción transversal se calculó considerando el *ladder* como viga curva lineal y tomando, como carga a aplicar, las reacciones obtenidas en el cálculo de los montantes, ya que son las que actúan en el plano de curvatura.

### 3. Cálculo de las travesías

El cálculo de las travesías se efectuó combinando el MEF

con fórmulas de Prontuario. Las cargas a aplicar fueron las reacciones obtenidas en el cálculo del *ladder*.

### 4. Muros Cortina

El dimensionado de los perfiles que componen la estructura portante se realizó de la siguiente manera:

- Travesaños: se consideran como vigas apoyadas en dos puntos, con cargas por la acción del viento y reacciones de los montantes, y cargas puntuales (en sentido vertical), debido al peso de los vidrios y de los montantes. El resultado es un tubo laminado en frío de  $110 \times 30 \times 3$ .

- Montantes: se consideran como una viga con dos o tres apoyos (el central en la estructura secundaria) con carga debida al viento únicamente. El resultado es un tubo laminado en frío de  $90 \times 30 \times 3$ . Los montantes centrales, que sólo cuentan con dos apoyos, han sido reforzados para conseguir el momento de inercia necesario.

### EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Para la ejecución del proyecto se ha contado, fundamentalmente, con:

1º) Un soporte gráfico, constituido por, aproximadamente, 200 planos de conjunto y detalles de los distintos edificios.

2º) Un soporte informático, constituido por ficheros de CATIA.

3º) Un soporte informático de cálculo, constituido por el programa "Cálculo Estructural mediante Elementos Finitos", con la aplicación Visual Basic para Windows.

4º) Un soporte informático con el Método de Elementos Finitos (MEF), para el estudio de tensiones y deformaciones en placas (acristalamientos).

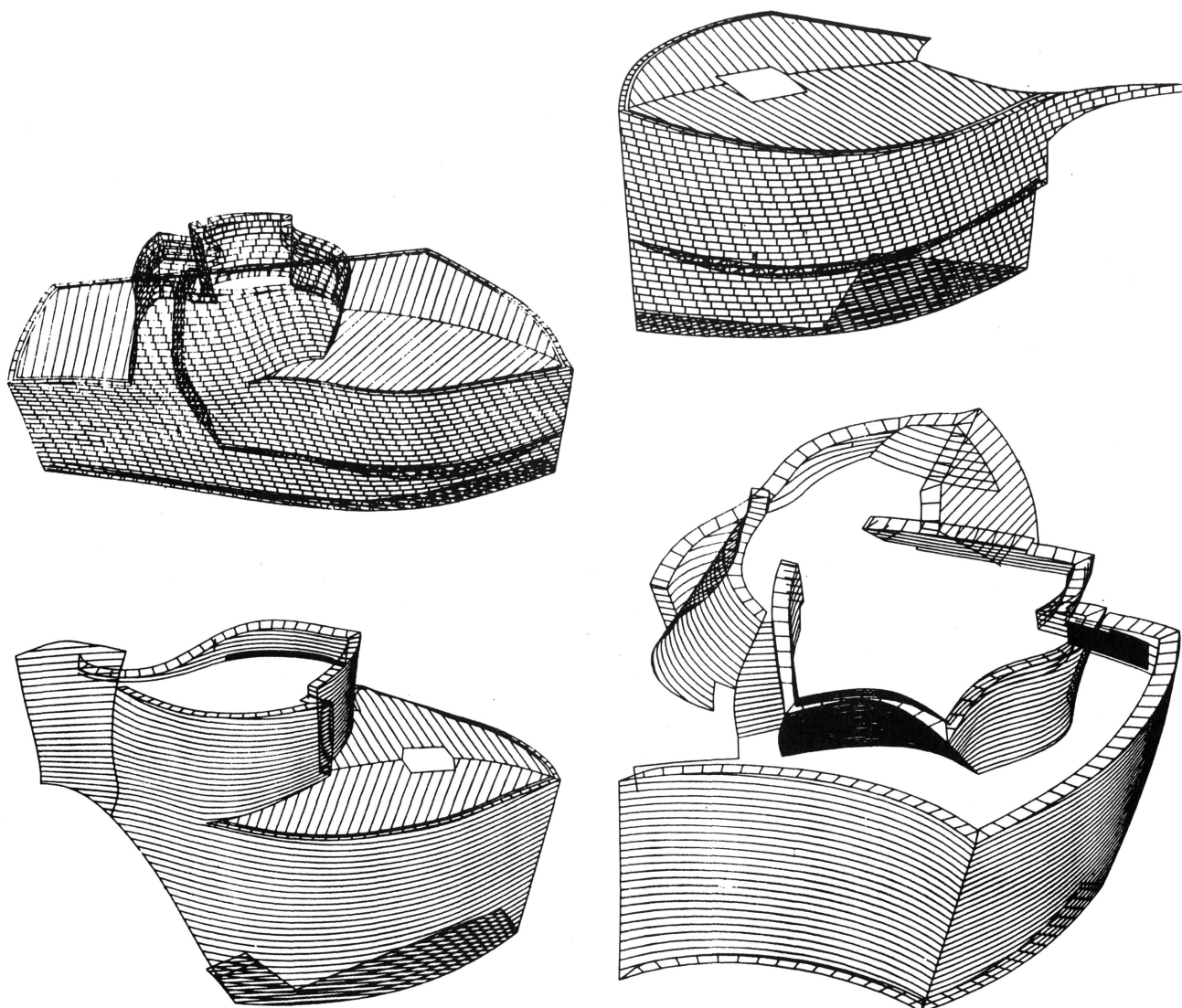
### SOPORTE GRÁFICO DE PLANOS

El estudio de arquitectura americano FOG/A (Frank O. Gehry & Associates, Inc.) suministró la siguiente información gráfica, recogida en planos extraídos en ficheros de AutoCad:

- Un juego de planos con plantas, alzados y secciones de los edificios metálicos en conjunto.

- Un juego de planos con alineaciones, secciones y detalles de pilares y estructura primaria, así como vistas isométricas de la misma, según los ejes de referencia. Ubicación del edificio en el solar.

- Cinco juegos de planos con una planta de situación relativa entre edificios metálicos. Cinco juegos de planos



*Cuatro de los nueve módulos que conforman el Museo.*

con muros cortina, lucernarios y ventanales salientes. Detalles de los mismos y encuentros entre elementos. Vistas isométricas de muros cortina.

- Nueve juegos, uno por módulo, que reúnen información sobre formas externas definidas de cada uno; revestimiento metálico, estructura secundaria, coordenadas de los puntos de referencia de estructura primaria en conjunto de líneas de referencia, dimensiones de los elementos estructurales. Estructura primaria: coordenadas, columnas, travesaños y nudos en vistas isométricas, según el proyectista americano de la misma.

#### SOPORTE INFORMÁTICO EN FICHEROS CATIA

Los ficheros CATIA constituyeron los verdaderos soportes para el desarrollo del proyecto y podían no coincidir con la información de AutoCad. Así, AutoCad proporciona la geometría aproximada de cada módulo y la forma más

exacta en todos sus contornos: recortes, aristas, entrantes, etc., que no figuran en los ficheros CATIA. Sin embargo, los ficheros CATIA aportaban las geometrías que se debían respetar, depurándolas.

Los ficheros CATIA nacieron de la digitalización de las formas de la maqueta del conjunto. Hubo que realizar la intersección de todos los encuentros entre edificios y desarrollarlos.

Los primeros ficheros en CATIA que se recibieron fueron 4 masters (conjuntos):

- Master de edificios en estructura primaria.
- Master de edificios en "exterior geometric" (paramento exterior de montantes).
- Master "cladding pattern" (piel exterior de paneles de titanio).
- Master de muros cortina.

Los master "exterior geometric" y "cladding pattern" iban acompañados por cada módulo independientemente.

## FACHADAS CIEGAS

La primera labor que hubo que realizar fue la de dividir cada módulo en un número determinado de facetas, entendiendo por faceta toda superficie, limitada, en toda su extensión, por unas líneas de contorno.

En el master de estructura primaria las líneas definen los ejes de los pilares y las líneas que unen los ejes de los mismos.

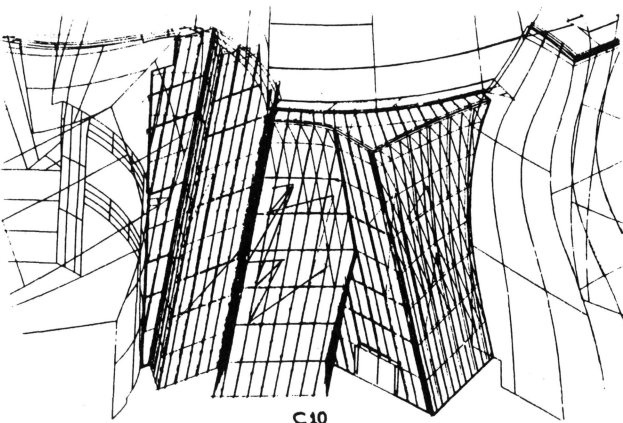
Era obligación de la empresa detectar las deficiencias y diferencias existentes entre los ficheros CATIA y los planos de AutoCad. Por ejemplo, en el M2 en CATIA no se correspondía el perfil perimétrico en los dos ficheros. En ese caso, prevalecía el AutoCad. Existía, pues, una reforma en la estructura primaria que había que notificar a FOG/A y ellos indicarían si se aceptaba o no y quien la realizaría. Con la solución definitiva se creaba un nuevo fichero, tanto de estructura primaria, como de "exterior geometric" y de "cladding pattern".

En definitiva, había que revisar una a una todas las facetas, depurarlas, fijar los contornos de los módulos con recortes y aristas y comprobar que, al unir las facetas contiguas, la arista de unión resultaba única.

También se comprobaron puntos en los que la estructura primaria invadía o interfería a su correspondiente "exterior geometric". Se reformó la estructura primaria.

Definidas las facetas y sus contornos únicos, ¿cómo se genera un *ladder* o estructura secundaria?

Como filosofía general, salvo casos excepcionales, como pueden ser las aristas con cubiertas y de acuerdo con el diseñador de la estructura primaria, la línea que define

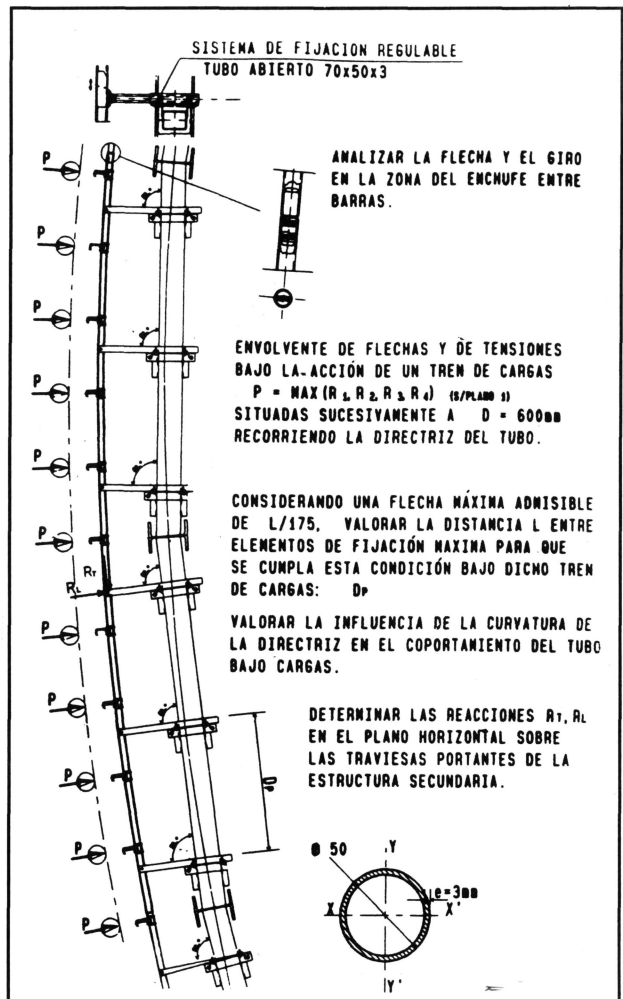


Ejemplo del tratamiento informatizado de las fachadas.

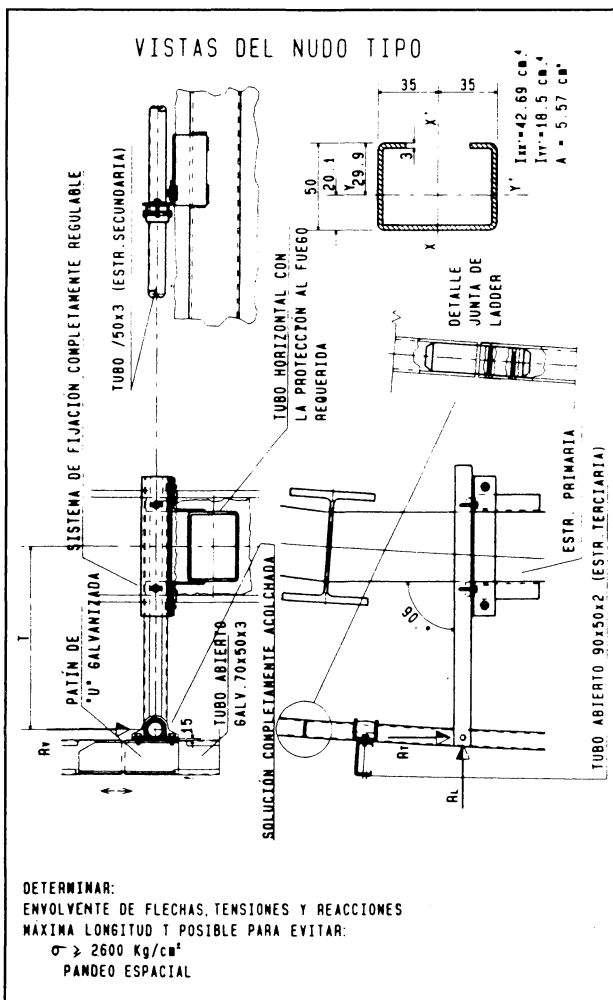
los ejes horizontales de ésta se encuentra en un mismo plano. De forma idéntica, la línea que define los ejes verticales.

El eje del *ladder*, o estructura secundaria o generatriz, de secciones horizontales, se encuentra, por proyecto, 180 mm más alto que la línea de los ejes horizontales de la estructura primaria. Asimismo, el conjunto de sus líneas de referencia se encuentran en una faceta paralela a la del "exterior geometric" y separada 100 mm hacia el interior del módulo.

Si se crea un plano paralelo al que contienen el eje horizontal de la estructura primaria y ascendido 180 mm del mismo y se secciona con la faceta paralela a la del "exterior geometric", desplazada 100 mm hacia el interior, se obtiene una línea de referencia que define la forma que presenta el *ladder* en toda la longitud de la faceta. Si se repite esta operación con cada uno de los ejes horizontales de la estructura primaria, quedarán definidos los *ladders* de toda la faceta.



Elementos resistentes que componen las fachadas ciegas: montantes, "ladders" y traviesas.



Detalles de la estructura de las fachadas.

En los encuentros de fachadas con cubiertas, en las que la línea no se encuentra en un mismo plano, hay que crear una línea quebrada, efectuando las operaciones antes citadas a los espacios limitados entre dos columnas contiguas.

Partiendo de las curvas, había que definir sus longitudes. Por proyecto, se fijó que la separación general entre columnas se establecía cada 3.000 mm y sus ejes verticales, aunque definen una línea quebrada, se encuentran contenidos en un plano. Si el conjunto de curvas de los *ladders* se seccionan por planos que contienen los ejes de los pilares cada 6.000 mm, quedan definidas sus longitudes.

Las curvas que definen los *ladders* difícilmente responderán a una ecuación matemática y, por lo tanto, será prácticamente imposible su fabricación. Sin embargo, el sistema CATIA puede generar una curva compuesta por un número definido de arcos de circunferencia. Así, si se le impone los condicionantes de tangencia, es decir, el empalme de un *ladder* con sus contiguos se efectúa de una forma continua, sin quiebros ni garrotes de flecha, de tal modo que la nueva curva generada pueda estar en un entorno de

$\pm 5$  mm del teórico del "exterior geometric" y, además, se le impone que lo haga con 2 ó 3 radios distintos, el sistema lo hace.

Se tiene ya su longitud, su forma y su capacidad de ser fabricada. Además, está situada en el fichero CATIA, con lo que están definidas sus coordenadas UTM, que servirá para su colocación en obra.

Su conexión a la estructura primaria se realiza a través de las traviesas, elementos que sustentan los *ladders*. Los de los extremos se sitúan a 500 mm de los ejes de las columnas y el paso máximo entre ellos es de 1.000 mm.

Para poder completar los datos necesarios para enviar a fabricación los *ladders*, faltaba definir la posición de los montantes, para lo que había que entrar de nuevo en el sistema CATIA, pero ahora en las facetas "exterior geometric", es decir, 100 mm al exterior de los *ladders*.

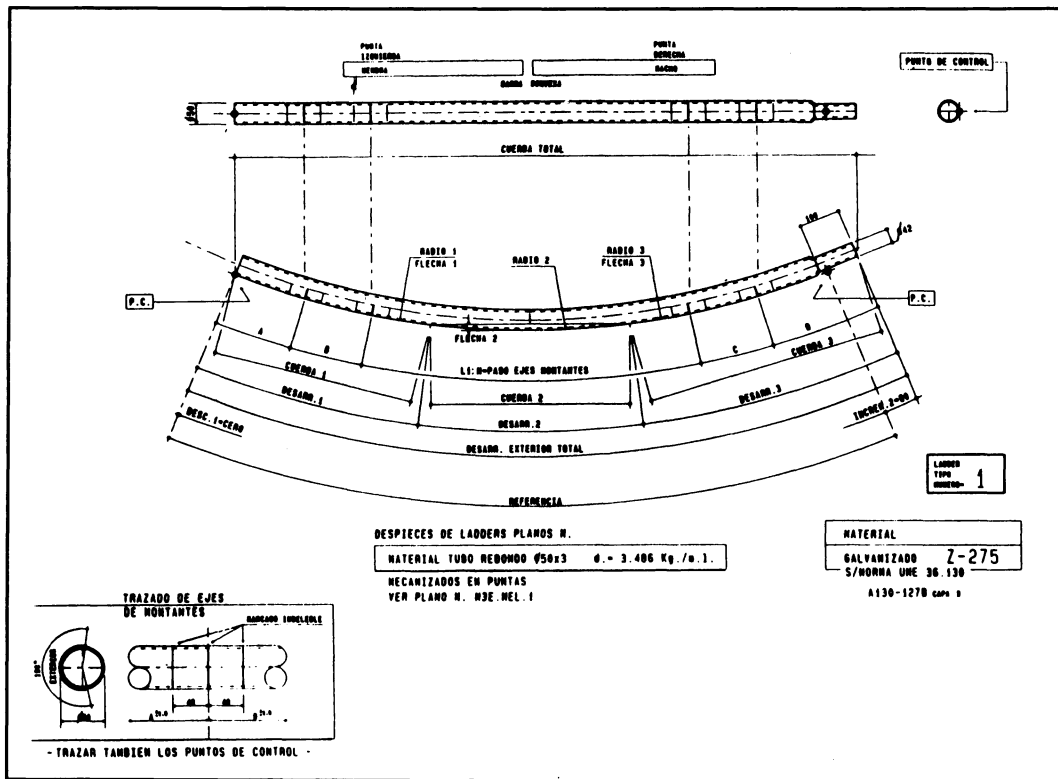
El sistema CATIA tiene la opción de que, empleando como "espina" la línea de un *ladder*, puede generar un tren de planos espaciados a la distancia que se desee, siendo siempre perpendiculares a la fracción de curva en que se encuentra.

Para elegir el *ladder* que servirá de espina, se sitúa en planta el conjunto de curva y se elige uno intermedio, con el criterio de que las líneas de montantes, que se van a definir, sean curvas contenidas en un solo plano y de que la torsión, a que se le someta para su apoyo en los *ladders*, no sea superior a  $\pm 5^\circ$  en sus extremos, con respecto al punto neutro. Si uno de estos condicionantes no se cumpliera, habría que crear otro tren de planos, a partir de otra "espina".

Al igual que al obtener los *ladders*, se han creado líneas curvas indeterminadas que hay que transformar para su fabricación. Se emplean los mismos criterios de tangencia, flecha y número de radios que con los *ladders*.

Como norma general, la dimensión de los montantes se fijó en 6.000 mm, lo que supone abarcar 2 vanos, es decir, 3 apoyos. De todas formas, hay que analizar la longitud total, dentro de la faceta, para estudiar su situación relativa con respecto a la del *ladder*, pudiendo haber elementos con más o menos apoyos. Si se observa que algún montante pueda sobrepasar las dimensiones máxima, se le analizará en el programa de Elementos Finitos "Cálculo estructura", obteniéndose las deformaciones y tensiones máximas que indicará si hay que reforzarlo o no.

La localización de las uniones entre montantes consecutivos se obtiene de la intersección de las curvas de los mismos con planos paralelos a los que contienen los *ladders*, separados 90 mm. Así se obtienen los extremos y, por lo tanto, su longitud.



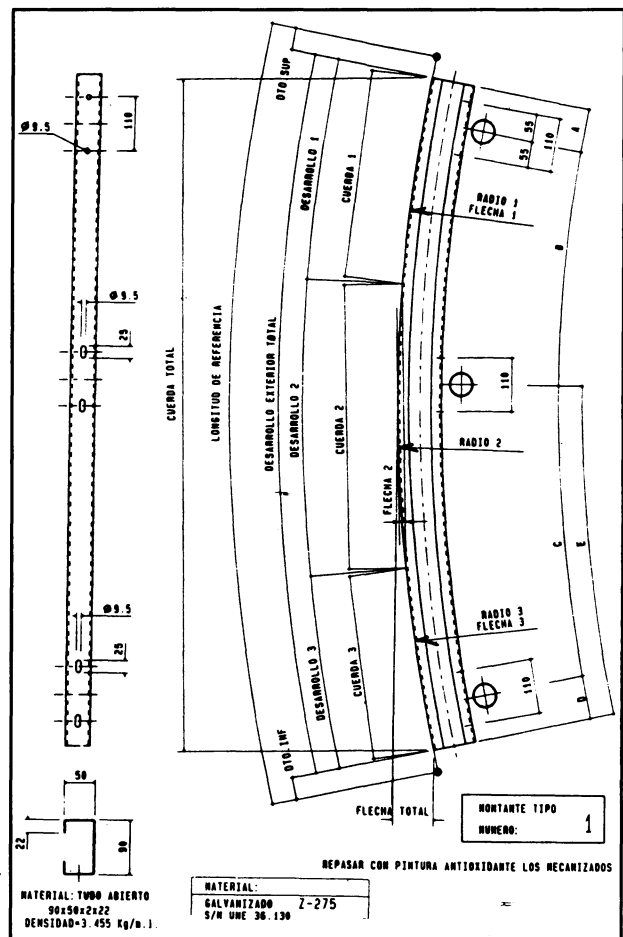
Plano de un "ladder" tipo.

La intersección de las curvas de montantes y ladders definen los puntos de localización de las bridas de unión entre ellos. Estos puntos se incorporarán en los planos de fabricación de los ladders.

El tercer elemento que forma parte de las estructuras secundaria y terciaria son las traviesas, que ya se han mencionado anteriormente. Han sido calculadas mediante el mismo programa de elementos finitos y se han empleado con un estándar que abarca el 70%. En las zonas con elementos muy volados o carencias de estructura se han estudiado otras soluciones, bien atirantando las estándares o creando vigas de tipo cercha.

Con los datos obtenidos en el sistema CATIA: líneas, longitudes, puntos de referencia, etc., se confeccionan planos mediante dibujo en 2D, en los que se agregan las secciones, mecanizados de amarres, empalmes, paletas de unión, etc., que los hacen legibles para su fabricación.

El paramento exterior de los montantes genera la faceta "exterior geométrica", sobre la que se asientan las chapas de acero galvanizado en continuo. Se comenzó el estudio en CATIA de la determinación de las mismas y ante la infinidad de dimensiones y formas que se generaban, haciendo muy dificultoso su equipamiento por medidas y ángulos, se optó, previa consulta y autorización de FOG, por crear chapas de 1.200 de largo por 1.600 mm de alto,



Plano de un montante tipo.

solapándose tipo teja, de tal forma que, en el supuesto de fallo del impermeabilizante, no se canalizara el agua hacia el interior. Las chapas atípicas que se generasen en aristas y contornos de las facetas se fabricarían previa medición en obra.

El primer intento que se realizó para el proyecto de los paneles de chapa de titanio fue tratar de conseguir la mayor estandarización, en número y dimensiones, de los mismos. Sin embargo, bajo esta hipótesis se creó el master "cladding pattern" y resultó que las líneas que delimitaban los contornos horizontales de los paneles no resultaban, en muchos casos, paralelas, debido, fundamentalmente, a la inclinación que adquirirían algunas fachadas.

Sacrificando una maxi-estandarización y tratando de minimizar la falta de paralelismo entre líneas, se optó por la creación de líneas horizontales, líneas de agua, en el mayor número de los casos, o la determinación de líneas, no de agua necesariamente, pero siempre, a partir del arranque, paralelas.

Para ello se realizó un trazado de líneas de agua sobre la superficie en la posición que se encuentra en la realidad, es decir, sobre el "exterior geometric" de todos los módulos, e incluso se llegaron a determinar las líneas de cadencia en el módulo M1 NEMO, fijándose esta medida en 230 mm. Se determinó también que la superficie vista de cada panel debía ser 1.150 x 650 mm. Además se predeterminó en qué vértices de qué módulos deberían coincidir las líneas de agua y en cuáles no era tan importante.

Así se creó el fichero definitivo Master "Metal Cladding Pattern".

Con este master, de líneas horizontales en CATIA y la chapa y sentido de arranque, así como las cadencias, definidos en planos AutoCad, se entró en la estación CATIA para marcar los bordes de chapa, de tal manera que se conservasen las superficies vistas y crear, así, la dimensión y forma de los paneles de chapa de titanio.

Se determinó también que el engatillado entre paneles de chapa de titanio debía contribuir a la creación de una membrana impermeable al agua de 90% y que, a su vez, fuese ventilada, para lo cual al panel se le aplicaron dos pliegues, uno horizontal y otro vertical, hacia el exterior y los otros dos hacia el interior y con una longitud de 25 mm. Esta disposición de engatillado obliga a un encadenamiento fijado: de abajo hacia arriba y de derecha a izquierda o viceversa.

El mantenimiento del paralelismo visual de líneas se consigue bien dentro de un margen estrecho, mediante distintos engatillados de las grapas, o bien con distintas dimensiones en altura, dependiendo de superficies muy tendidas. Para la colocación se crean planos de alzado de

todas las facetas, con indicación expresa de cada una de las chapas.

## MUROS CORTINA

Los datos de los que se parte son, al igual que con las fachadas ciegas, de un soporte gráfico AutoCad que siguen líneas de referencia de la estructura secundaria y de la autoportante, así como soluciones a los detalles de encuentros, remates, cornisas, etc. y un soporte informático de ficheros CATIA conteniendo tres masters parciales de los muros cortina (master "exterior glazing"), definidos por líneas de referencia de la estructura autoportante y secundaria, lo mismo que los AutoCad.

Las líneas de referencia, tanto de la estructura autoportante como secundaria, definen los ejes de la cara exterior de los perfiles de acero que componen unas y otras.

Lo mismo que en las fachadas ciegas, estas informaciones hay que analizarlas y depurarlas, para lo cual hay que independizar cada uno de los muros en todo su conjunto y subdividirlo en fachadas o facetas. Acto seguido hay que realizar un análisis de interferencias de dichas facetas entre sí (líneas de encuentro únicas) y con los edificios con los que colindan, llegando a un modelo definido de líneas del autoportante: los remates son factibles, el muro cortina está en su sitio, las superficies se ajustan a lo solicitado, etc.

El paso siguiente es conseguir la aprobación de una estructura secundaria pre-proyectada en la que se cumpla la coincidencia de ejes en el mismo plano, tanto verticales como horizontales, de la estructura autoportante con la estructura secundaria. Hay que recordar que al estudio de FOG/A le interesaba que prevaleciese la estética exterior y con ello había que ajustar la estructura secundaria.

A partir de la pantalla con los ejes de referencia de la autoportante y la secundaria pre-proyectada se analizaron las faltas de estructura para su conexión. Los contornos se analizaron con la estructura primaria más próxima, siendo la que se propuso crear y fabricar a FOG/A. Una vez aprobado, se complementó.

En cuanto a las faltas de estructura secundaria en el interior de las superficies, se determinó que debía existir, abarcando 4 módulos de vidrio. Por lo tanto, se definió que los travesaños fuesen de una pieza, abarcando en horizontal dos módulos (normales) y en vertical los montantes tenían una longitud de travesaño a travesaño.

Donde se comprobaba que no existía estructura secundaria en zonas interiores de las superficies, se proponía su existencia y se aprobaba. En casos particulares de coronaciones en lo que podrían comprender 6 módulos (2 normales más 2 pequeños) en lugar de cuatro, se analizaban los



cálculos y se tomaba la solución más conveniente. Generalmente se aprobaban sin ampliación de estructura.

Ya se tenían definidas las líneas de referencia, que debían converger en los nudos: estaban definidos los perfiles y ahora había que fabricarlos.

El primer problema que se presentó era dar con un elemento de enchufe entre montantes y travesaños que permitiera su posición relativa, ya que debido a la configuración de los muros cortina se generaban infinidad de ángulos, tanto en sentido de paramento como en aplomado. Para ello, se diseñó un enchufe tipo rótula que permite absorber desviaciones de  $\pm 20^\circ$  en sentido de paramento y  $\pm 10^\circ$  en la verticalidad.

En los muros cortina no se mantiene el condicionante de que los travesaños deben de definir líneas de agua, sino que en ellos los planos que contengan los ejes tanto de montantes como de travesaños deben de ser perpendiculares al plano de los vidrios o plano de fachada. En el caso en que la superficie está torsionada o es de facetas poligonales, los ejes deben de estar contenidos en la bisectriz del ángulo generado.

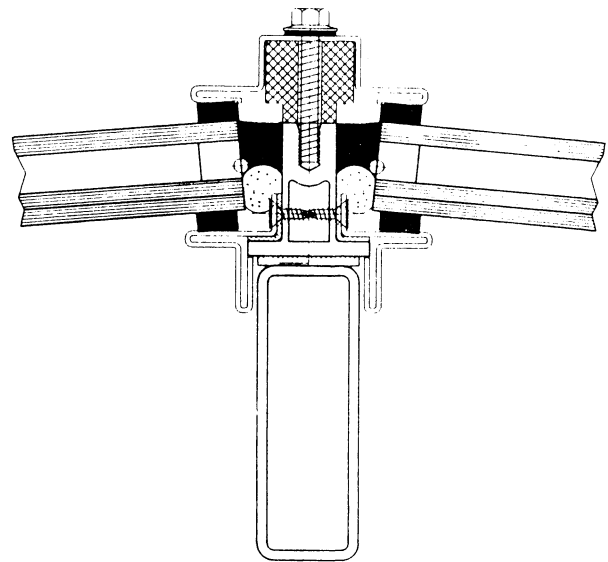
Ante la dificultad surgida en el desarrollo de los nudos facetados, debido al torsionado de travesaños, a la no continuidad en las líneas y después de complejas consideraciones, se decide que la única manera de resolver el problema para la fabricación es modelizar nudo a nudo y barra a barra, lo que supone realizar en pantalla un plano para cada elemento, con todos sus herrajes mecanizados y cortes complejos. Para ello se emplea un módulo de estructuras de CATIA que permite "extruir" los elementos.

En las fachadas planas e inclinadas se modeliza el nudo y a partir de ahí se obtienen todos sus componentes. Sin embargo, en zonas facetadas ha habido que modelizar todos los elementos, incluso las llantas de unión.

Una vez modelizados los elementos y a partir de un programa expresamente creado con tal fin, se extrae el plano de fabricación completo. Este plano indica la línea de referencia definida para indicar su posición relativa dentro de la fachada y la posición respecto a la misma de todos sus cortes y mecanizados.

Para poder realizar cortes con doble inclinación, fue necesaria la adquisición de la máquina apropiada. Pero el ordenador y la máquina no se entendían. Fue precisa la creación de un nuevo programa para la conversión de los grados de corte de acabado de la pieza, con los grados de posicionamiento del elemento en la máquina de corte.

El aluminio que compone la cabeza para el alojamiento de los acristalamientos ha seguido idéntico proceso.



*Detalle de nudo de los muros cortina.*

Debido a la articulación de los nudos, para facilitar la colocación, y a la dispersión de medidas y formas de los huecos así generados para el alojamiento de los acristalamientos, fue preciso realizar la medición de todos los huecos. Para ello, se generó un programa paramétrico que, combinando los puntos topográficos obtenidos mediante estación libre, próximos a los ingletes, con los descuentos de holguras a dar a cada acristalamiento, se obtuvo cada unidad definida por sus tres, cuatro, cinco, seis, etc. lados, así como sus diagonales e incluso el ploteado con su forma, dimensiones y composición.

Este mismo programa, traducido a un sistema DXF sirve, junto con los planos individuales de cada acristalamiento, para el corte y fabricación de los mismos.

Estos datos obtenidos topográficamente, convenientemente tratados, pueden proporcionar los planos para la fabricación en taller de junquillos y tapetas exteriores.

Como en ciertas unidades de muro cortina existen superficies torsionadas, y todos los volúmenes de la obra han de cumplir con la condición de ser planos, se ha recurrido, para la creación de dicha superficie, a la transformación de los huecos rectangulares en dos huecos triangulares, girados los grados necesarios para generar dicha superficie.

Un estudio de cálculo de láminas delgadas, mediante el empleo del MEF, ha determinado la colocación de un elemento metálico de soporte según la diagonal correspondiente.

## EJECUCIÓN EN OBRA

### FACHADAS CIEGAS

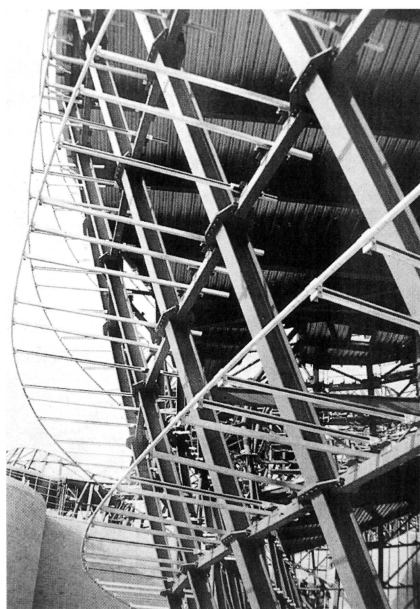
En la estructura primaria y de acuerdo con la hipótesis de cálculo, se establecieron unos elementos de espera para la

colocación de las traviesas, apoyos de los *ladders*, situados a 500 mm a ambos lados de las columnas y distribuidas con un paso máximo de 1.000 mm. Sobre dichas esperas se asienta un sistema de anclaje tridimensional, de prefijado por presión, que permite la correcta posición de la traviesa, constituida por un tubo de acero laminado en frío de 70 x 50. El conjunto anclaje - traviesa se preposiciona a una medida de aproximadamente 500 mm, es decir, 100 mm hacia el interior del edificio, de la cota de paramento del master "exterior geometric". A continuación, en los extremos de dichas traviesas se posiciona el *ladder* sobre el que están definidos dos puntos de referencia.

En la obra existían distribuidas lo que se ha dado en llamar un conjunto de camillas, formando un circuito cerrado, visible cada una con su precedente y su posterior y con sus coordenadas XYZ perfectamente definidas. Ubicando una estación topográfica en cualquiera de estas camillas, puede definirse un punto desde el que pueda trabajarse sin interferencias visuales para la colocación de los *ladders*.

Hay que decir que la estación topográfica está capacitada para tener introducidas en su memoria, y de hecho las tiene, las coordenadas topográficas necesarias para la determinación de cualquier faceta.

Premontado el *ladder* en las traviesas, en una primera aproximación, se sitúan en los puntos de referencia sendas dianas y topográficamente se determinan las coordenadas de los mismos. Automáticamente, la estación determina las diferencias con las coordenadas reales y, mediante una comunicación radiotelefónica, el topógrafo indica las correcciones a realizar. Se lleva a cabo y se realiza una nueva comprobación. Si todo está correcto, se sujeta definitivamente. Dichas operaciones se repiten a todos los *ladders* que componen la faceta.



A continuación, se procede a la colocación de los montantes. Todos ellos van provistos en su extremo superior de un mecanizado que servirá de cuelgue del *ladder* correspondiente y en el trazado existente en el mismo. Respetando las curvas que tengan tanto los *ladders* como los montantes, éstos se emplazarán en sus lugares definidos, amarrándolos mediante abrazaderas provistas de un elemento autovibratorio y de rotura de puente térmico.

Con la colocación de todos los montantes se define el exterior geometric de la faceta correspondiente.

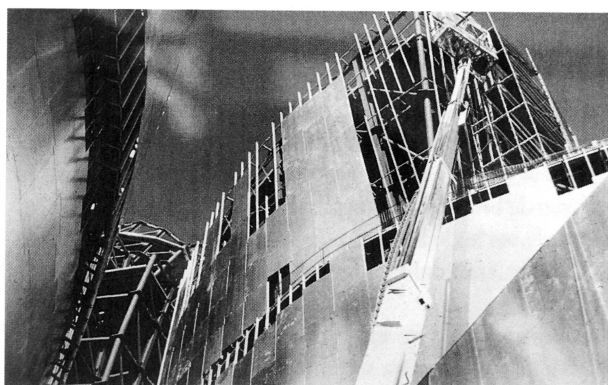
La labor a realizar a continuación consiste en la obtención de la cubierta de la superficie que han generado los montantes, lo que se obtiene mediante la instalación de chapas de Sendzimir de 2 mm de espesor y dimensión general 1.200 x 1.600, sujetándose a la estructura terciaria (montantes) y entre sí, mediante el empleo de tornillos de rosca, provistos de un recubrimiento orgánico capaz de resistir 500 horas a la corrosión roja, en cámara de niebla salina.

La disposición de estas chapas es efecto teja, para no permitir la posible entrada de agua, caso de producirse alguna filtración a través de impermeabilizante dispuesto sobre las mismas.

Este impermeabilizante lo constituyen láminas de material asfáltico sobre un soporte de lámina de polietileno de 1,25 mm de espesor total, con las características particulares de ser autoadhesivas y autocicatrizantes. La colocación se ha realizado de abajo hacia arriba con efecto teja y solapes, y marcados en la propia membrana de 90 mm.

En el soporte gráfico de AutoCad que se suministró, como dato venían definidas las líneas que han de seguir los paneles de titanio, el punto de arranque de colocación y la cadencia de una fila, con respecto a las demás, constituyendo una superficie tipo escama.

El concepto general es seguir líneas horizontales, líneas de agua y conservar visualmente el paralelismo de líneas



desde un punto alejado de la fachada. Para ello se ha vuelto a utilizar la estación topográfica, trasladadas las coordenadas al master "cladding pattern". Así, partiendo de un punto de arranque, predefinido, se van colocando los paneles de acuerdo a los tipos y marcas definidos en planos preparados para ello, sujetándose mediante 8 grapas de acero inoxidable de 1,50 mm de espesor, con dimensiones distintas, según las curvaturas e inclinaciones de las facetas.

La forma dada a los paneles en lo relativo a sus pestañas de engarce, junto con las diferentes grapas mencionadas anteriormente, confiere al sistema la posibilidad de ejercer una función fuelle, tanto en sentido longitudinal como vertical, para conseguir el efecto de paralelismo visual. Cada cuatro franjas de paneles se realizan nuevas comprobaciones topográficas.

El efecto escama del recubrimiento de estas fachadas, obliga a iniciar su colocación, como ya se ha dicho, a partir de piezas de remate no normalizadas, continuándose con piezas más o menos estandarizadas y finalizando la fila en una pieza irregular. Todas las piezas especiales de arranque y de remate, así como de contorno o arista, se miden, ejecutan a pie de obra, en un local habilitado con la maquinaria adecuada para tal fin.

El número de facetas resultantes ha sido de 146 unidades. La superficie total cubierta ha sido de 23.870 m<sup>2</sup>. Paneles de chapa de titanio: 33.000 unidades (Tabla 1).

## MUROS CORTINA

La instalación de la estructura que compone la estructura

portante de los muros cortina se ha ejecutado, casi en su totalidad, en lo que se ha dado en llamar "por peines".

Siendo los travesaños los elementos dominantes, con el primero y segundo y sus montantes correspondientes se ha creado un bastidor, que, por su sistema de enchufes, resulta ser articulado.

Teniendo introducidos en la memoria las coordenadas correspondientes a los nudos de la retícula de la fachada a colocar del muro cortina de que se trate, se emplea un método similar al utilizado para la colocación de los *ladders*, sólo que, en este caso, se trata de posicionar una superficie plana, definida por las coordenadas de sus cuatro vértices y que se corresponden con los de la malla existente en el master muros cortina.

Posicionado este primer elemento, se fija provisionalmente mediante un sistema de corredera y tornillo a presión.

El elemento a colocar a continuación estará constituido por el tercer travesaño con sus montantes fijados mediante sus articulaciones y colgando de las mismas. Los nuevos puntos de referencia serán ahora dos y se localizarán en los extremos del travesaño superior. Se enchufarán los montantes en los elementos localizados en la parte superior del primer módulo colocado, se situará topográficamente y se prefijará, idénticamente, al anterior. Y así, sucesivamente, hasta la coronación. Se realiza una última comprobación de coordenadas y, una vez todos los puntos en su sitio, se procede a la sujeción definitiva, mediante la eliminación de los tornillos de presión y su sustitución por pasadores de diseño especial.

TABLA 1  
FACHADAS METÁLICAS CIEGAS

MÓDULO	DENOMINACIÓN	Nº DE FACETAS	SUPERFICIE
M1	NEMO	23	2.612 m <sup>2</sup>
M2	FOX	7	2.090 m <sup>2</sup>
M3	FISH	28	8.850 m <sup>2</sup>
M4	CANOPY	9	1.185 m <sup>2</sup>
M5	BOOT	7	1.353 m <sup>2</sup>
M6	RIVER GALLERY	15	2.689 m <sup>2</sup>
M7	BEPPPO	13	1.051 m <sup>2</sup>
M8	POTEMKIN	9	1.282 m <sup>2</sup>
M9	FLOWER	M9A: 26 / M9B: 9	M9A: 1.630 m <sup>2</sup> / M9B: 1.126 m <sup>2</sup>
Total		146	23.868 m <sup>2</sup>



Foto 3

Los techos y ciertas fachadas han requerido la utilización de métodos más artesanales, debido a su difícil accesibilidad, pero, en síntesis, son equivalentes.

Una vez determinadas las dimensiones de los junquillos, mediante el sistema descrito en la ejecución del proyecto, se procede a su incorporación a la estructura portante complementado por los burletes de apoyo y mediante tornillería de acero inoxidable. El acristalamiento ha requerido la necesidad de trenes de ventosas especiales, así como de elementos de elevación y acceso del personal muy sofisticados.

Los sellados de estanquidad se realizan entre los acristalamientos y el perfil perimetral de aluminio anodizado, de tal modo que queda oculto al rematado exterior con la colocación de las tapetas con sus burletes y tornillos, igualmente de acero inoxidable y con sus cabezas vistas.

Todos los muros cortina, en sus módulos de arranque y, por motivos de seguridad, van provistos de detectores sísmicos.

Asimismo, de cara a la limpieza y mantenimiento, tanto de las fachadas ciegas como de los muros cortina, se han incorporado *tie-backs* o ganchos de cuelgue, con vistas a su uso por técnicos verticales (escaladores).

El acabado de los edificios se completa con el diseño y ejecución de encuentros entre ellos, canalones de evacuación, cornisas, remates, etc., todos ellos en chapa de acero inoxidable y de muy compleja realización y ajuste.

El número de facetas resultantes ha sido de 76 + 30 techos. La superficie total cubierta ha sido de 5.744 m<sup>2</sup>.

Unidades de acristalamiento muros cortina: 2.508 unidades.

Lucernarios. Ventanas salientes (Tabla 2).



TABLA 2  
COMPOSICIÓN DE LOS ACRISTALAMIENTOS

Tipo de acristalamiento	Exterior	Cámara	Interior
Composición General	Control solar 6 mm	12 mm	Laminar 5 + 5 (2PVB) mm
Seguridad/atenuación rayos UV	Control solar 6 mm	12 mm	Laminar 5 + 5 (4PVB) mm
Decalados	Laminar 5 + 5 (2PVB) mm	12 mm	Control solar 6 mm (cara 3)
D. Seguridad/atenuación rayos UV	Laminar 5 + 5 (4PVB) mm	12 mm	Control solar 6 mm (cara 3)
Factor sombra 50% p.b.	Serigrafiado 10 mm templado	12 mm	Laminar 5 + 5 (4PVB) mm - Low-E (cara 3)
Acústico/Factor sombra a 50% p.b.	Serigrafiado 10 mm templado	20 mm	Laminar 10 + 10 (4PVB) mm -Low-E (cara 3)
Acústico/Control solar	Control solar 5 + 5 + 10 mm	16 mm	Laminar 8 + 8 (4PVB) mm