

SUPERFICIES ARQUITECTÓNICAS SINGULARES

ESTUDIO SUPERFICIE

PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA



ALUMNA: YOLANDA ORTIZ BOTO

TUTORES: RAFAEL JUAN LIGORIT TOMÁS
FRANCISCO JAVIER SANCHÍS SAMPEDRO

GRADO EN INGENIERÍA DE LA EDIFICACIÓN

PRESENTACIÓN: JUNIO 2011

SUPERFICIES ARQUITECTÓNICAS SINGULARES

ÍNDICE

1. EL RÍO TURIA. EL CORAZÓN DE VALENCIA.....	1	6.4.1 Secuencia obtención de la superficie inferior.....	27
2. LA CIUDAD DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS.....	2	6.5. Análisis de la superficie intermedia de la cubierta.....	28
2.1. Breve descripción de los elementos constituyentes.....	3	6.6. Superposición superficies.....	29
Hemisféric		6.7. Volumetría de la cubierta.....	30
Museo de las artes y las ciencias		7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	31
L'umbracle		7.1. Análisis de las cargas que soporta la cubierta.....	32
L'oceanogràfic		7.2. Estudio de las deformaciones de la cubierta.....	33
Palau de les arts reina sofía		7.3. Estudio a torsión de la cubierta.....	34
Ágora		7.4. Planos.....	35
3. LA SUPERFICIE SINGULAR SELECCIONADA.....	9	7.5. Descomposición de la cubierta en dovelas.....	39
3.1 Presentación de la pluma.....	10	8. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO.....	41
4. BREVE RESEÑA DEL AUTOR.....	11	8.1. Secuencia constructiva.....	41
5. OTRAS OBRAS DE SANTIAGO CALATRAVA.....	12	8.2. Análisis constructivo por fases.....	42
6. ESTUDIO GEOMÉTRICO DE LA SUPERFICIE.....	16	8.3. Equipos.....	53
6.1. Justificación geométrica de las figuras.....	17	9. CONCLUSIONES.....	54
6.2. Teorema de Dandelin.....	19	10. BIBLIOGRAFÍA.....	55
6.3. Análisis de la superficie superior del ala.....	22		
6.3.1 Secuencia obtención de la superficie superior.....	24		
6.4. Análisis de la superficie inferior del ala.....	25		



1. EL RÍO TURIA. EL CORAZÓN DE VALENCIA

Las riadas han marcado notablemente la historia del viejo cauce del río Turia. Entre 1321 y 1957 se registran 22 desbordamientos, 11 crecidas y 15 noticias de inundaciones del Turia en Valencia, de hecho, las ocurridas en los siglos XVI y XVII obligaron a formar una gran muralla para la ciudad con una infraestructura de puentes y pretiles que fue permitida por una especie de consellería.

Dicha consellería era una institución equivalente a la actual consellería de obras públicas, y los impuestos que fijaba permitieron construir ese cauce que hoy tenemos y todos los puentes y pretiles que sucesivamente iban siendo derribados con el tiempo.

Pero la mayor inundación fue la de 1957, el 14 de octubre a las 2 de la madrugada se desbordaba el Turia inundando la capital con una pavorosa riada que afectó a dos tercios de la población. A media mañana las aguas empezaron a retroceder, sin embargo, a medio día comenzó a llover de nuevo.

No se recuerda una tragedia tan grande desde 1879, donde, en algunos puntos, el agua llegó a alcanzar los 2 metros.



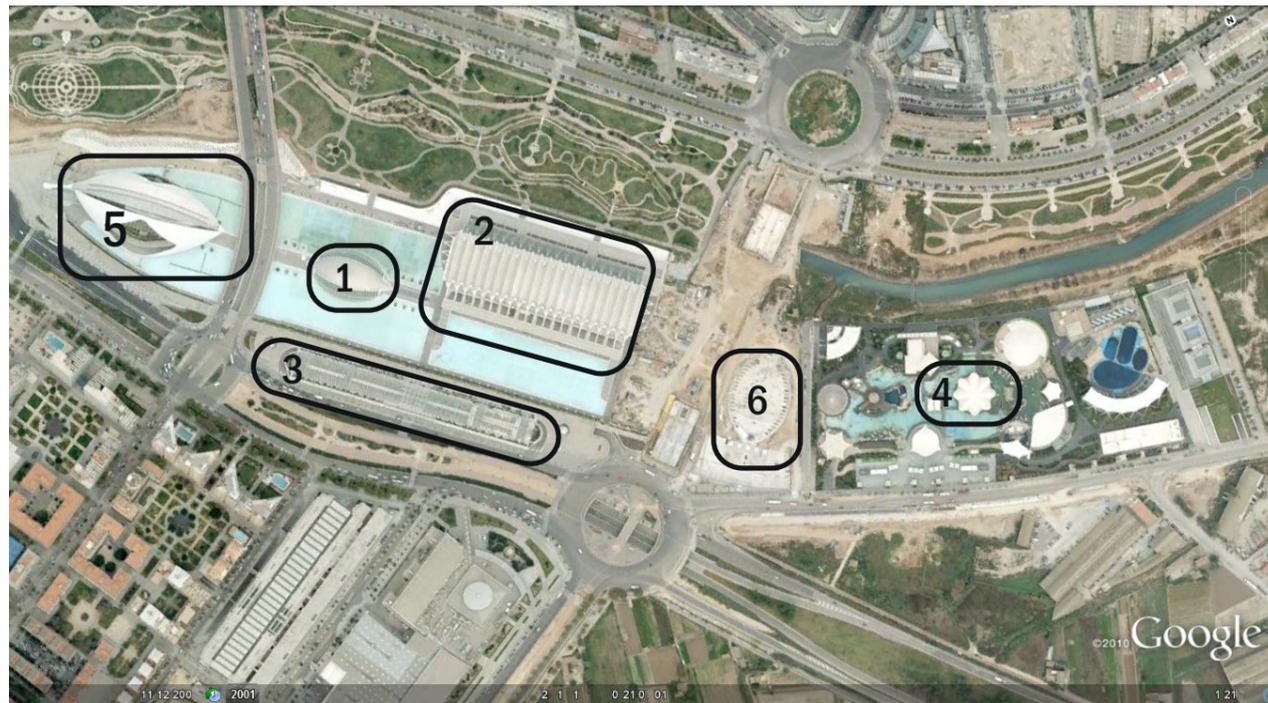
A partir de ese momento, se decidió cambiar el curso del río, por lo que en 1964 empezaron las obras que culminaron en el 76 con la entrega por parte de los Reyes de la propiedad de los terrenos a la ciudad y a partir de ahí se iría formando la actual estructura lúdica



2. LA CIUDAD DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS

La Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia, cuyo proyecto comenzó en 1996, constituye la obra más importante y ambiciosa a la que se enfrenta esta ciudad en el siglo XXI. Se encuentra ubicada en una superficie de más de 300 000 m² a lo largo de casi 2Km en el tramo final del antiguo cauce del río Túria, junto a la salida de la autopista del Saler.

Se trata de un conjunto único dedicado a la divulgación científica y cultural que está integrado por seis grandes elementos, obra de los arquitectos Santiago Calatrava y Félix Candela. Dichos elementos son el Hemisféric (1), el Museo de las Artes y las Ciencias (2), el Umbracle (3), el Oceanogràfic (4), el Palau de les Arts Reina Sofía (5) y el Àgora (6).



Elementos constituyentes de la Ciudad de las Artes y las Ciencias

- 1- El Hemisféric
- 2- El Museo de las Artes y las Ciencias Príncipe Felipe
- 3- El Umbracle
- 4- El Oceanogràfic
- 5- El Palau de les Arts Reina Sofía
- 6- El Àgora



2.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES



HEMISFÉRIC

-Inaugurado en 1998

-Fue el primer edificio de la Ciudad de las Artes y las Ciencias en abrir sus puertas al público.

-Cubierta ovoide de más de 100m de longitud que alberga en su interior la gran esfera que constituye la sala de proyección con una pantalla cóncava de 900m², que se convierte en la sala de proyección más grande de España.

-La sala de proyecciones alberga tres sistemas de proyección diferentes, los cuales son:

CINE EN GRAN FORMATO, IMAX Dome Cinema

Este sistema consigue una extraordinaria nitidez y luminosidad debida a la proyección, y esto, unido al gran tamaño de la pantalla y a la calidad del sonido, contribuyen a crear un realismo excepcional que integra literalmente al espectador en las imágenes.

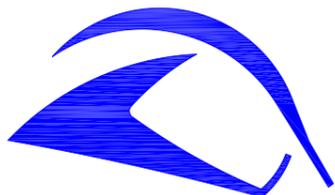
CINE DIGITAL 3D

Se trata de proyecciones digitales con el máximo realismo tridimensional gracias a la magia de las gafas activas 3D y los más modernos desarrollos tecnológicos. Las proyecciones se realizan en una pantalla rectangular de aproximadamente 12x6 metros.

PROYECCIONES DIGITALES

El más avanzado sistema de proyección digital a cúpula completa. Este nuevo tipo de proyección permite al espectador adentrarse en el mundo de la astronomía y la animación digital, con unos efectos ópticos imposibles de obtener en el mundo analógico.

-Obra realizada por Santiago Calatrava.





MUSEO DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS

-Puesta en marcha en el 2000.

-Museo destinado a dar a conocer de forma didáctica, interactiva y amena todo lo relacionado con la evolución de la vida, la ciencia y la tecnología. Para ello, el espectacular edificio cuenta con más de 26.000 metros cuadrados de exposiciones.

Dicho museo se ha convertido en un referente mundial de la ciencia interactiva. El vehículo que utiliza el Museo consta de una enorme variedad de exposiciones temporales y animaciones científicas de todo tipo que despiertan la curiosidad acerca de las nuevas tecnologías y los avances de la ciencia, generando un aprendizaje divertido en el que el protagonista es siempre el visitante, que elige dónde ha de ir y lo que quiere saber.

La diversidad de exposiciones interactivas y las numerosas actividades de divulgación que vienen desarrollándose en el Museo han culminado en un importante éxito de público, que sin duda ha respondido calurosamente a la propuesta de divulgar y difundir la ciencia y la tecnología desde la diversión y el entretenimiento, pero sin renunciar al mínimo rigor científico necesario a la hora de abordar los temas que se tratan.

Algunas de estas animaciones tienen lugar en la zona expositiva. La intención es posibilitar al visitante la participación y la realización de preguntas. Los mensajes científicos que recogen las exposiciones se explican aquí de una manera más cercana.

Además, el Museo de las Ciencias se ha convertido en un destacado foro para la celebración de muy diversos congresos científicos

-Obra diseñada por Santiago Calatrava





L'UMBRACLE

-Inauguración en el 2000

- Es un mirador de más de 17.500 metros cuadrados con zona expositiva desde el que se puede contemplar la globalidad de edificios, estanques, paseos y zonas ajardinadas de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. Presenta vegetación propia de la región mediterránea, de la Comunidad Valenciana y de países tropicales, que varía a lo largo de las estaciones del año, y donde además existe una interesante muestra de esculturas contemporáneas de artistas de renombre internacional.

En su interior alberga el aparcamiento de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, con capacidad para 665 vehículos y 25 autobuses repartidos en dos plantas, pero es en su parte superior donde se manifiesta su peculiaridad con el "Paseo de las Esculturas", una galería de arte al aire libre con nueve esculturas de autores contemporáneos, con un jardín central arbolado desde cuyo balcón situado en el lado norte se disfruta de una magnífica panorámica de todo el complejo.

- Obra diseñada por Santiago Calatrava.





L'OCEANOGRÀFIC

-Apertura en 2003

-El Oceanogràfic de la Ciudad de las Artes y las Ciencias es el mayor acuario de Europa, y en él se representan los principales ecosistemas marinos del planeta. Cada edificio se identifica con los siguientes ambientes acuáticos: Mediterráneo, Humedales, Mares Templados y Tropicales, Océanos, Antártico, Ártico, Islas y Mar Rojo, además del Delfinario, con 24 millones de litros de agua y una profundidad de 10,5 metros.

Durante la visita y a lo largo del recorrido por las diferentes instalaciones, podremos conocer de cerca el comportamiento y forma de vida de los más de 45,000 ejemplares de 500 especies diferentes que alberga.

Su arquitectura vanguardista, la distribución de los diferentes edificios, la ausencia de barreras visuales, su vocación educativa, el gran tamaño de los acuarios, las instalaciones especiales como los túneles- uno de ellos con 70 metros de longitud- o las bóvedas permiten al visitante vivir una experiencia única de acercamiento al mundo marino y a la gran biodiversidad que guardan los océanos y mares del planeta.

El Oceanogràfic de la Ciudad de las Artes y las Ciencias se concibe así como un parque natural, un centro científico y divulgativo, que contribuye a la recuperación de fauna y flora protegida, promoviendo ante sus visitantes un mensaje de conservación y respeto por el medio ambiente, al tiempo que desarrolla programas específicos de investigación sobre las ciencias del mar y sus habitantes.

-Posee dos edificios característicos, el edificio de acceso y la cafetería, de los cuales destacan sus cubiertas realizadas por Félix Candela





PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA

-Inaugurado en 2005.

- Edificio rodeado por un entorno verde de 87.000 metros cuadrados de ajardinamiento y láminas de agua de más de 10.000 metros cuadrados con paseos circundantes.

Posee 4 grandes salas:

SALA PRINCIPAL, con capacidad para más de 1.400 asistentes, está concebida como recinto de ópera fundamentalmente, pero convertible en escenario para ballet y otras artes escénicas.

AULA MAGISTRAL. Su capacidad es de 400 personas, se encuentra ubicada en la parte oeste, especialmente diseñada para actuaciones en directo de pequeñas formaciones musicales.

AUDITORIO, con capacidad para más de 1.400 espectadores

TEATRO MARTÍN Y SOLER. Situado en el edificio destinado a las Artes Aplicadas, adyacente al Palau, con capacidad para 400 espectadores, donde se ubicará la Academia de Perfeccionamiento.

Además, el edificio dispone de instalaciones para actividades docentes y otras estrechamente relacionadas con los ámbitos artísticos y culturales.

- La forma global del edificio es lenticular desarrollándose bajo una gran sobrecubierta o pluma metálica, soportada mediante dos apoyos, uno extremo en su zona oeste y otro intermedio quedando la zona este de la cubierta totalmente en voladizo. El material por excelencia es el hormigón blanco ya que forma parte de los grandes soportes estructurales del edificio mientras que el “trencadís” es el segundo material de mayor uso que reviste las espectaculares “cáscaras” del Palacio.

-Obra realizada por Santiago Calatrava.





ÀGORA

-Inaugurado en 2009

-Espacio con una versatilidad que permite acoger eventos de diversa naturaleza. Un escenario multifuncional proyectado para la celebración de congresos, convenciones, conciertos o representaciones, con la posibilidad de transformarse en zona para exposiciones. Sede del Valencia Open 500 de tenis, una de las grandes citas deportivas internacionales.

El Ágora de la Ciudad de la Artes y las Ciencias es el edificio que culmina el proyecto. Cumple la función de bisagra entre el Oceanogràfic y el resto del complejo, consiguiendo una continuidad del complejo y, al mismo tiempo, armonizando sendas concepciones arquitectónicas.

La parcela sobre la que se ubica el Ágora tiene forma trapezoidal, mide 13.500 metros cuadrados y sobre ella se ubica un edificio de estructura metálica de planta similar a una elipse apuntada de 88 metros de largo por 66 de ancho.

El área de la cubierta tiene 4.811 metros cuadrados, una altura de setenta metros y un aforo con capacidad para un total 6.000 espectadores.

-Obra diseñada por Santiago Calatrava.



3. LA SUPERFICIE SELECCIONADA

La superficie escogida corresponde a la cubierta del PALAU DE LES ARTS. Se trata de una gran “pluma” metálica soportada mediante dos apoyos, uno extremo en su zona oeste, realizado con hormigón, y otro intermedio, que apoya directamente sobre el edificio, quedando la zona este de la cubierta totalmente en voladizo.



3.1. PRESENTACIÓN DE LA PLUMA

Es el elemento más espectacular del Palau con una longitud de 230m y más de 70m de altura.

Está realizada mediante módulos metálicos en su totalidad exceptuando el apoyo de hormigón. Los módulos por los que está compuesta se denominan dovelas, y éstas fueron creadas en un astillero de Sevilla debido a sus dimensiones. Todas las dovelas que componen la pluma son diferentes puesto que la sección de ésta es variable.

La pluma es metálica en su totalidad pero en la zona del apoyo intermedio está macizada de hormigón, solución que se adoptó para conseguir una mayor inercia en ese punto. El macizado se va disminuyendo conforme va llegando a los extremos, de manera que, las zonas extremas no se encuentran macizadas. Este gran elemento posee dos apoyos, uno intermedio, que se asemeja a un caballete, y otro en el extremo de la pluma, el cual está resuelto por una pieza llamada pilono, que es la que conecta la pluma con el soporte de hormigón. En dicho soporte de hormigón se encuentra una gran cantidad de armadura post-tensionada para poder sujetar la pluma como ya veremos en el desarrollo de la ejecución de la misma.

La pluma trabaja en voladizo desde el apoyo intermedio

La cubierta se ha revestido con bandejas rectas de aluminio, que engatilladas entre sí, van fijadas mediante unas piezas de acero, sujetas mecánicamente a la estructura. En el encuentro de las alas con la zona central de la sobrecubierta, y a lo largo de la misma, aparecen ciento ocho huecos que serán lucernarios de aluminio y vidrio translúcido.



Apoyo en el extremo de la pluma



Punta de la pluma en voladizo



4. BREVE RESEÑA DEL AUTOR



SANTIAGO CALATRAVA

Nacido en 1951 en, Benimamet, Valencia. Desde los 8 años estudió en la Escuela de Bellas Artes donde empezó formalmente su preparación como dibujante y pintor. A los 13 años su familia le envió a París a través de un programa de intercambio estudiantil. De regreso a Valencia, terminó sus estudios escolares en el colegio de las Escuelas Pias, y se matriculó en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia, donde se graduó como arquitecto y donde realizó un curso de post-graduado en urbanismo. Posteriormente se trasladó, en 1975, a Zúrich, donde estudió durante cuatro años ingeniería civil en el Instituto Federal de Tecnología, en el cual se graduó con un doctorado en 1979.

Finalizada la etapa de estudios, trabajó como profesor auxiliar en el Instituto Federal de Tecnología, donde comenzó a aceptar pequeños encargos y a participar también en concursos de nuevos proyectos. En 1983 le fue adjudicada su primera obra de cierta importancia, la Estación de Ferrocarril de Stadelhofen, situada junto al centro de Zúrich donde también había establecido su despacho. Al año siguiente, Calatrava diseñó el puente Bac de Roda en Barcelona que fue el primero que empezó a darle cierto reconocimiento internacional. A este seguirían el del Alamillo de Sevilla (1992) y el Puente de 9 d'Octubre en Valencia (1995).

En 1989 Calatrava abrió su segundo despacho en París, mientras estaba trabajando en el proyecto de la Estación de Ferrocarril del Aeropuerto de Lyon. Dos años después creó su tercer despacho, esta vez en Valencia, donde trabajaba en un proyecto de grandes dimensiones, la Ciudad de las Artes y de las Ciencias. Su prestigio internacional fue rápidamente en aumento.

Hoy se considera a Calatrava como uno de los arquitectos especializados en grandes estructuras. Contrariamente a lo que es habitual en muchos arquitectos, que ocultan las estructuras de sus edificios, Calatrava, como ingeniero que es, las convierte en elementos esenciales en las mismas.

La obra de Calatrava supone una auténtica revolución en la arquitectura, caracterizada por la reunión de la arquitectura y la ingeniería, que vienen circulando separadas desde el siglo XVIII. Santiago Calatrava supone un reencuentro con la tradición constructiva de la arquitectura, con influencias de Fernando Higuera, Jørn Utzon, Antonio Gaudí, y las arquitecturas gótica y romana. En un momento en que muchas arquitecturas hacen gala de una gran banalidad, y muchas obras de ingeniería hacen ostentación involuntaria de una gran ordinariéz, Calatrava ha producido una gran influencia en la arquitectura contemporánea.



5. OTRAS OBRAS DE SANTIAGO CALATRAVA



Edificio Turning Torso,
Suecia

Inaugurado el 27 de agosto de 2005, después de cuatro años de construcción.

Es un rascacielos residencial de 190 metros de altura y 54 plantas situado en la ciudad sueca de Malmö.

El edificio, construido en acero, vidrio y hormigón armado, se estructura en nueve cubos rotatorios, cada uno con 6 plantas, cuyo principal elemento estructural es un núcleo de hormigón armado, de 10,6 metros de diámetro



Estación de tren Oriente

Las obras terminaron en 1998.

El complejo incluye una estación de metro en los dos primeros niveles y un espacio comercial y una estación ferroviaria en los dos niveles siguientes.

El edificio está cubierto por un gran techo acristalado.





Centro internacional de ferias y congresos, Santa Cruz de Tenerife

Su construcción comenzó en 1997 y finalizó en 2003, siendo inaugurado el 26 de septiembre. El edificio se encuadra dentro de los postulados de la arquitectura tardomoderna de finales del siglo XX



Aeropuerto de Bilbao

Calatrava lo diseñó de tal forma que desde el exterior se asemejase a un ave emprendiendo el vuelo, de ahí que se conozca popularmente con el nombre de La Paloma.



Puente en Jerusalem

Se construyó entre 2005 y 2008, siendo inaugurado en 24 de junio de ese año. El conjunto de los cables y la forma de la estructura sugiere un arpa gigante "el arpa de rey David" como un símbolo de la ciudad sagrada.



Palacio de congresos Princesa Leticia, Oviedo

La última fecha estimada para su apertura es mayo de 2011.

Se distribuirá en tres plantas, la planta baja donde se encuentran el hall principal o área expositiva, con una superficie de 2.300 m², una sala de reuniones con capacidad para 217 personas y una sala multiusos de 410 m²; una planta de acceso al Auditorio que dispone de 2.144 butacas y está cubierto por una impresionante cúpula de acero blanco de 45 m de altura; y una tercera planta que da acceso a las 12 salas de reuniones, de las cuales 8 de esas salas son modulares.





Puente de la barqueta sobre el Guadalquivir, Sevilla

Se compone de un arco de acero de 214 m. cuyos extremos forman un pórtico triangular en cada lado, atirantado por el propio tablero que tiene una longitud de 168 m. cuyo únicos apoyos son cuatro soportes verticales a una distancia de 30 m. sobre las orillas del río sin más apoyos intermedios y con un ancho de 21,40 m. Su construcción se realizó en tierra para posteriormente girarlo con la ayuda de barcazas hasta su definitivo emplazamiento.



Puente del Alamillo

Terminado en 1992, es un puente atirantado de pylon contrapeso que cruza el río Guadalquivir.

El puente consta de un único pilar que actúa de contrapeso para los 200 m del puente gracias a trece largos cables.

El puente no tiene tirantes de retenida (solo hay tirantes a un lado de la torre) constituyendo el primer puente atirantado que no posee esta banda de tirantes de manera que no se recogen las fuerzas que reciben los tirantes de un lado de la torre con otros tirantes que estuvieran al otro lado.



Puente de la Alameda, Valencia

Realizado entre 1991-1995.

El puente, de 140 m de luz, está constituido por un gran arco ligeramente inclinado construido en acero blanco. Bajo el mismo se ha construido una plaza y una estación de metro también diseñada por Calatrava.



Torre de Montjuïc, Barcelona

Fue construida entre 1989 y 1992 en el anillo olímpico de Montjuïc en Barcelona. Esta torre de acero de 136 metros de altura tiene un diseño innovador respecto a la mayoría de torres de comunicación, con una forma estructural que no se basa en un tronco vertical sino que tiene una silueta que recuerda a un deportista portando la llama olímpica. A la vez que la parte superior, zona de transmisión, se parece a una flecha y su respectivo arco. En la base tiene una fuente, siendo la misma de hormigón armado y parece adaptar este motivo con sus elementos similares a olas. La torre es de color blanco y también está formado por placas lisas metálicas.





Bodega de Ysios, la Rioja Alavesa

Inaugurada en 2001, el edificio se apoya en dos muros portantes de hormigón armado con una separación de 26 metros entre ellos. Dichos muros están revestidos por lamas verticales de madera tratada con sales de cobre. Estos muros trazan una línea sinusoide, actuando como cerramiento y que recuerdan a una hilera de barricas. La cubierta está formada por vigas de madera que apoyan sobre los muros laterales, describiendo así una superficie ondulada. El material empleado en su acabado exterior es aluminio, que contrasta con la madera de los muros



Puente de Ixas Aurre, Andorra

Fue inaugurado en 1994. Está construido en acero y cruza la ría que el río Artibai forma en su desembocadura en el mar Cantábrico tiene 70 metros de longitud y es el acceso rodado al puerto de la localidad, uno de los más importantes puertos pesqueros del País Vasco



Museo de arte de Milwaukee, Wisconsin

La estructura, cuya forma recuerda un barco, está realizada en acero blanco y cemento y se comunica con la Wisconsin Avenue a través de un puente peatonal atirantado. El diseño está rematado por una espectacular estructura cinética realizada en cristal y acero que se abre y cierra como las alas de un gran pájaro y cuyo eje es un mástil inclinado 47 grados, paralelo al mástil del puente peatonal adyacente. A nivel de la orilla la ampliación alberga un atrio; un espacio de 1.500 metros cuadrados destinado a exhibiciones temporales; un centro educativo con un auditorio con capacidad para 300 personas; una tienda de regalos; y un restaurante para cien comensales, situado en el centro del edificio, con vistas panorámicas sobre el lago Michigan.

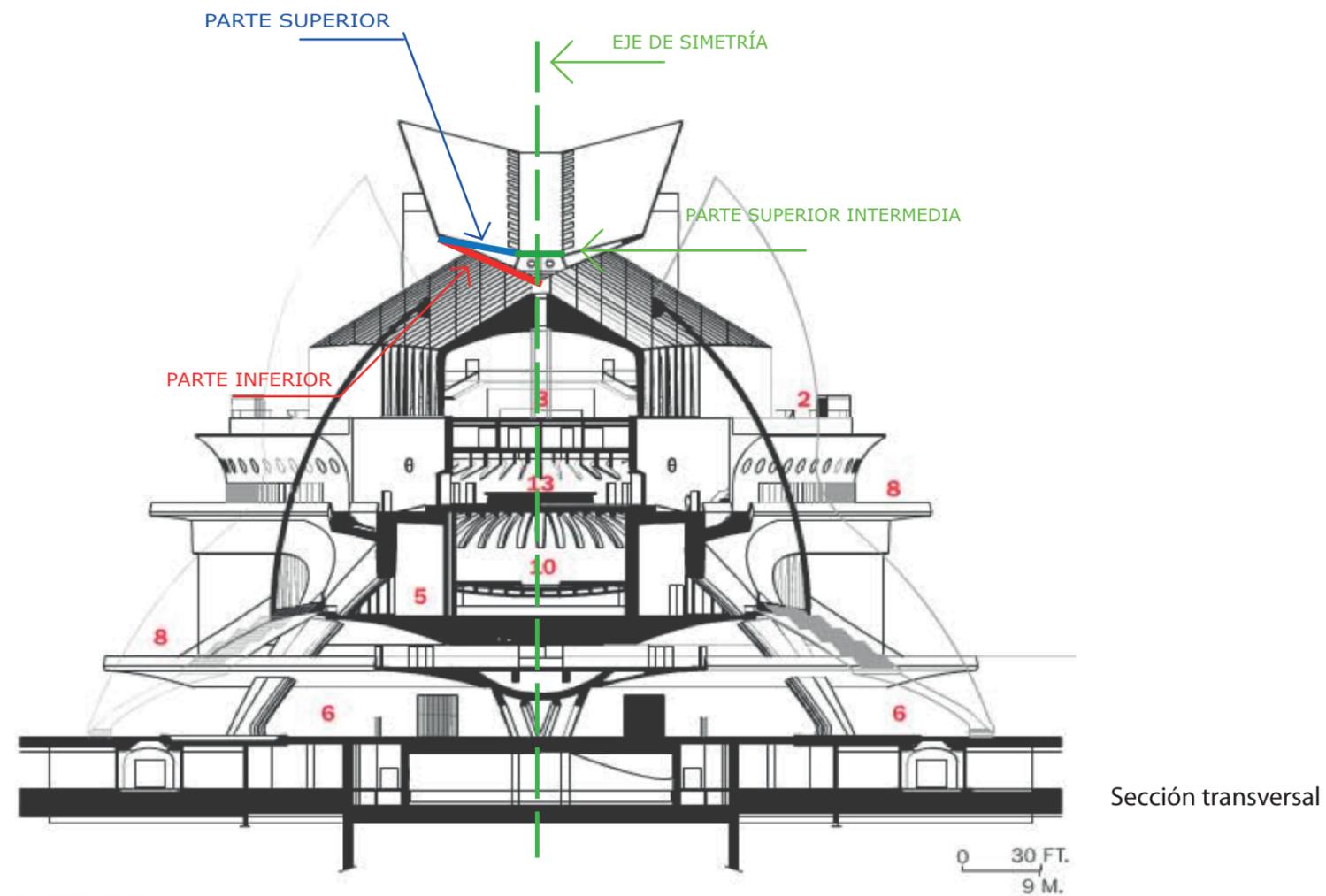


6. ESTUDIO GEOMÉTRICO DE LA SUPERFICIE

La superficie de estudio, pluma, es un elemento simétrico respecto a su eje longitudinal, debido a esto, el estudio lo realizaremos únicamente de un lateral.

Para el estudio de la geometría de la pluma, se analizarán, por separado, las diferentes superficies que la componen.

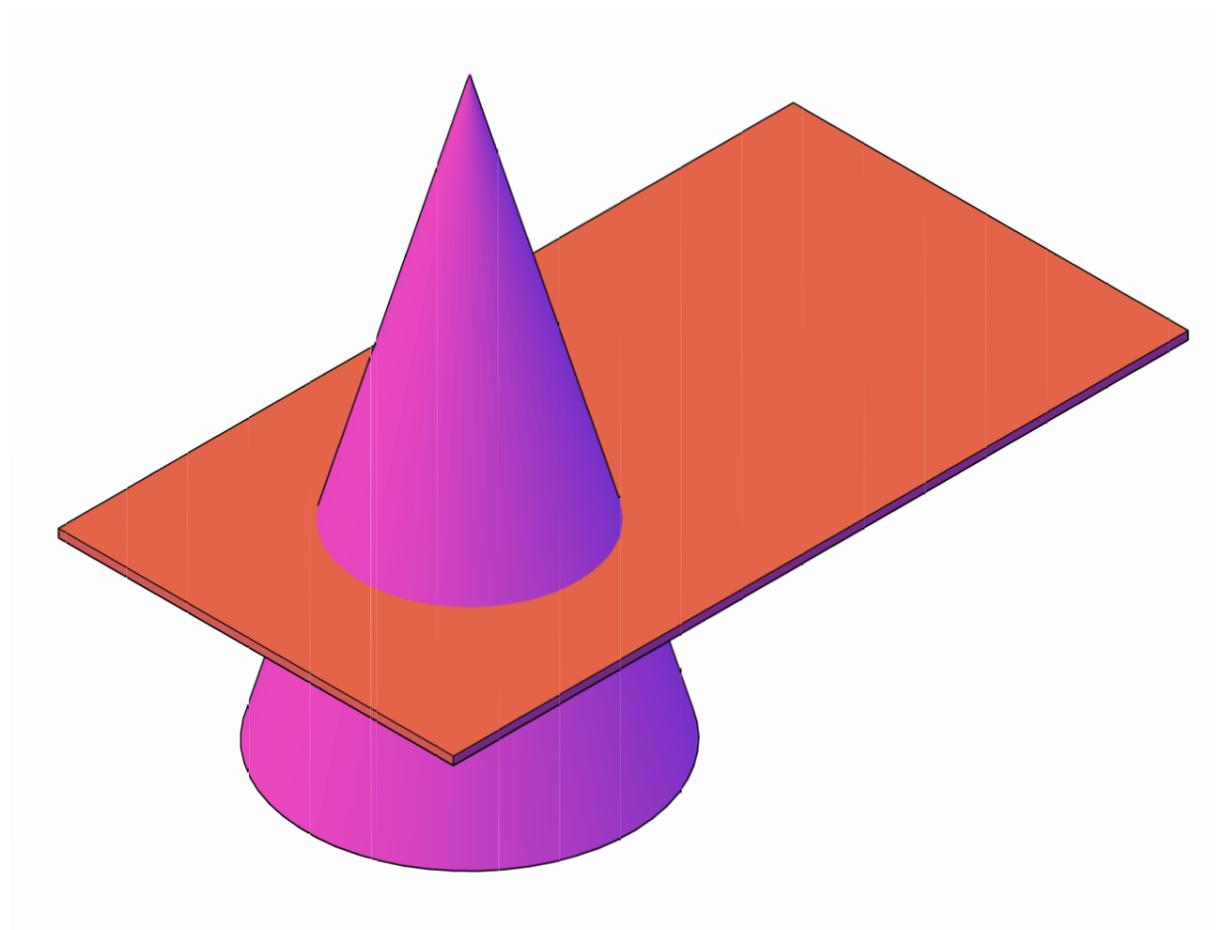
Estas superficies son: la parte superior que forma el ala de la pluma, la inferior y, finalmente, la superior central.



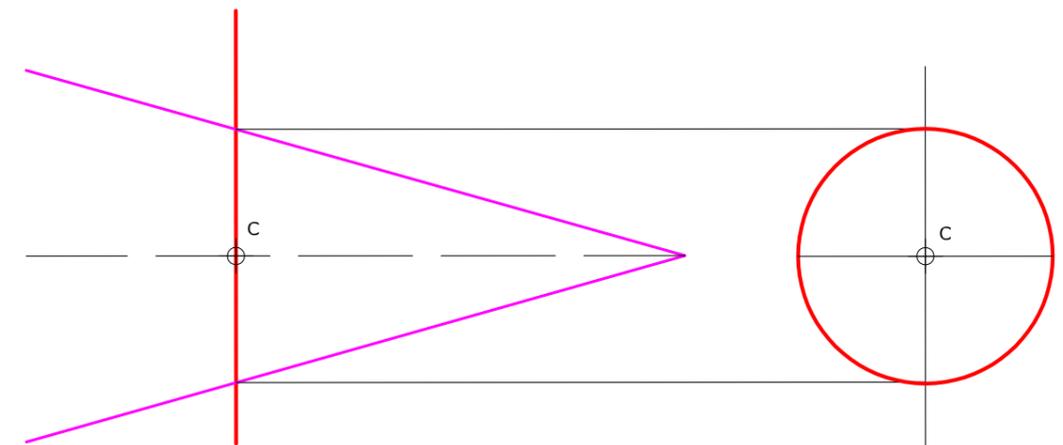
6.1. JUSTIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FIGURAS

A continuación, se analiza geoméricamente como se originan, tanto la circunferencia como la elipse, debido a la intersección sobre el cono de los planos (el paralelo a la base para el caso de la circunferencia y el inclinado para el caso de la elipse).

OBTENCIÓN DE LA CIRCUNFERENCIA



Justificación geométrica.

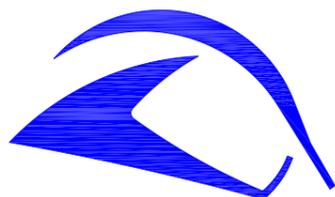
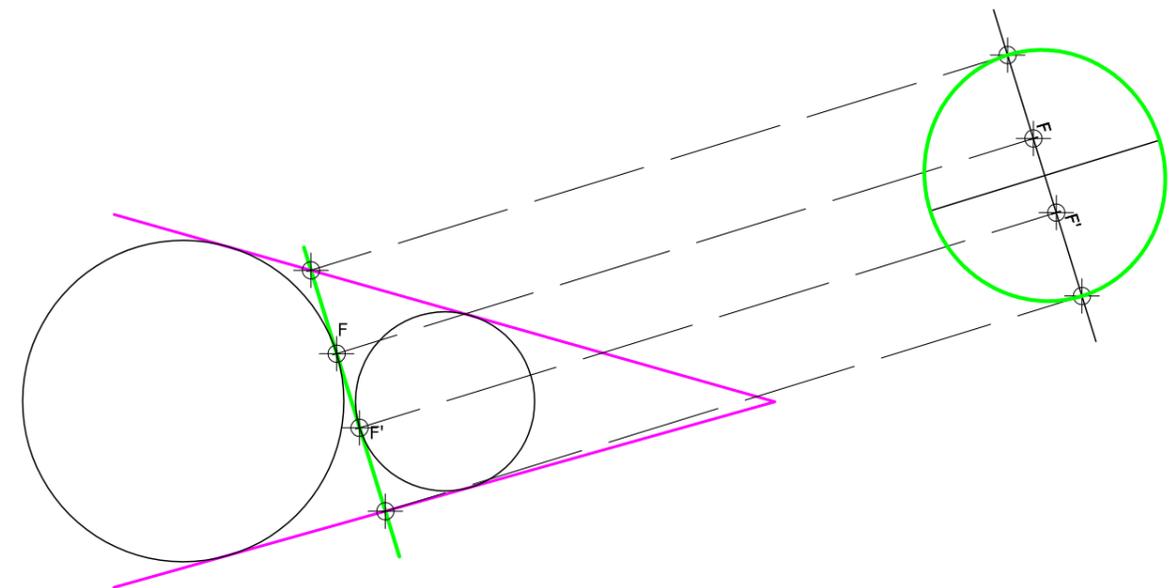
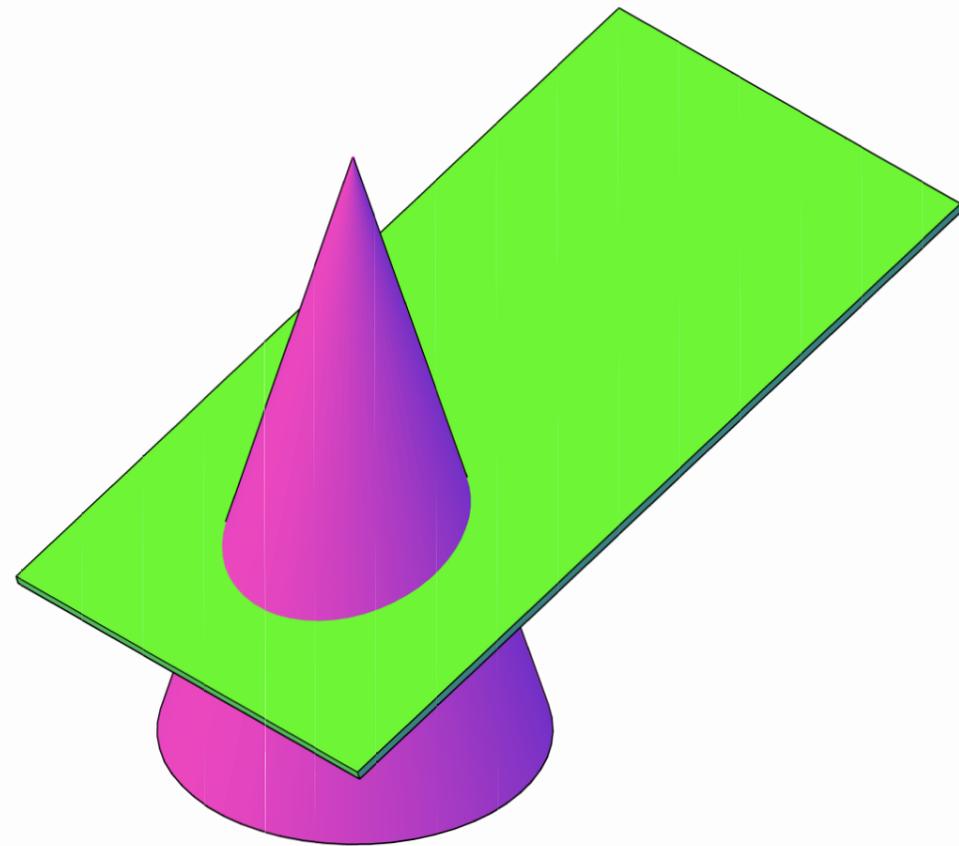


OBTENCIÓN DE LA ELIPSE

La elipse que se nos genera es prácticamente una circunferencia, debido a que, el plano que nos intersecta el cono tiene muy poca inclinación, en concreto 17° .

El método empleado para dibujar la elipse ha sido mediante el Teorema de Dandelin, el cual, estudiaremos más adelante.

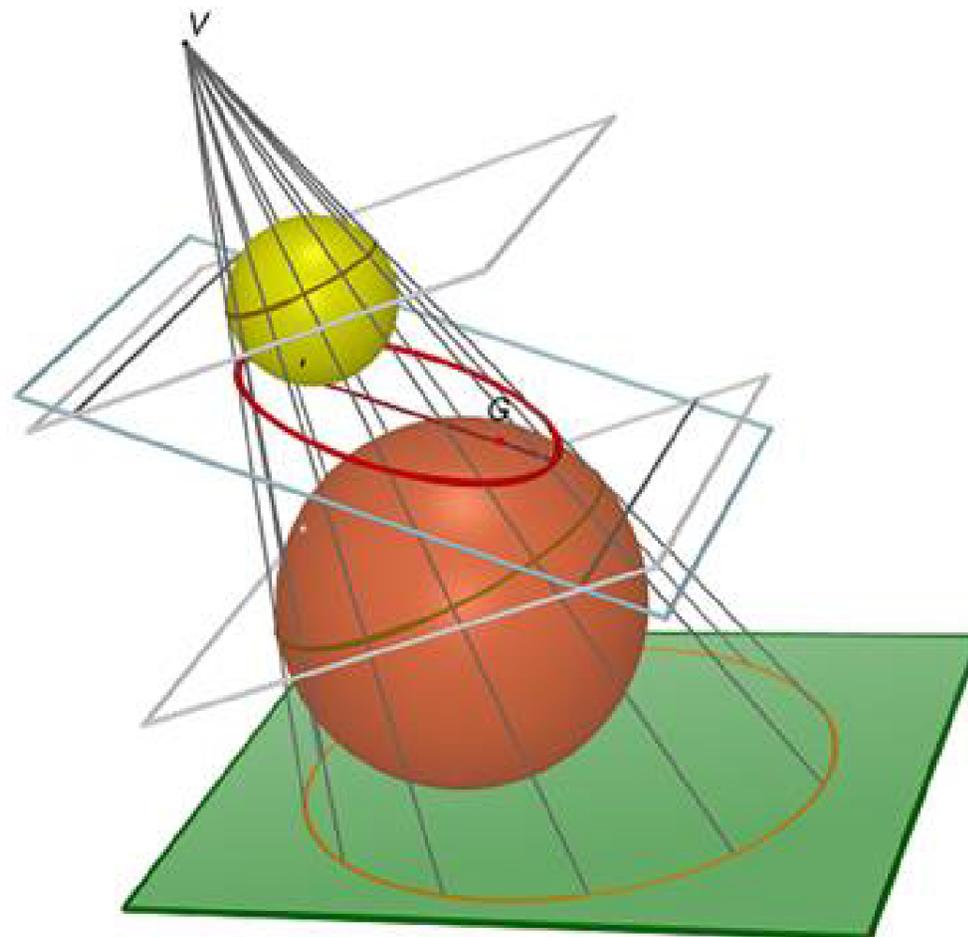
Justificación geométrica.



6.2. TEOREMA DE DANDELIN

Este teorema nos dice que: "Dada una superficie cónica y un plano que la secciona formando una cónica, siempre se pueden dibujar una o dos esferas (una en el caso de la parábola) tangentes interiores a la superficie cónica y al plano de corte".

"Los puntos de tangencia de las esferas con el plano de corte, son los focos de la cónica, y las circunferencias intersección de las esferas con la superficie cónica hacen que los planos que pasen por dichas circunferencias, corten al plano de corte en dos rectas que son las directrices de la cónica.



El punto V es el vértice y el G es el correspondiente a uno de los dos focos que se nos generan.

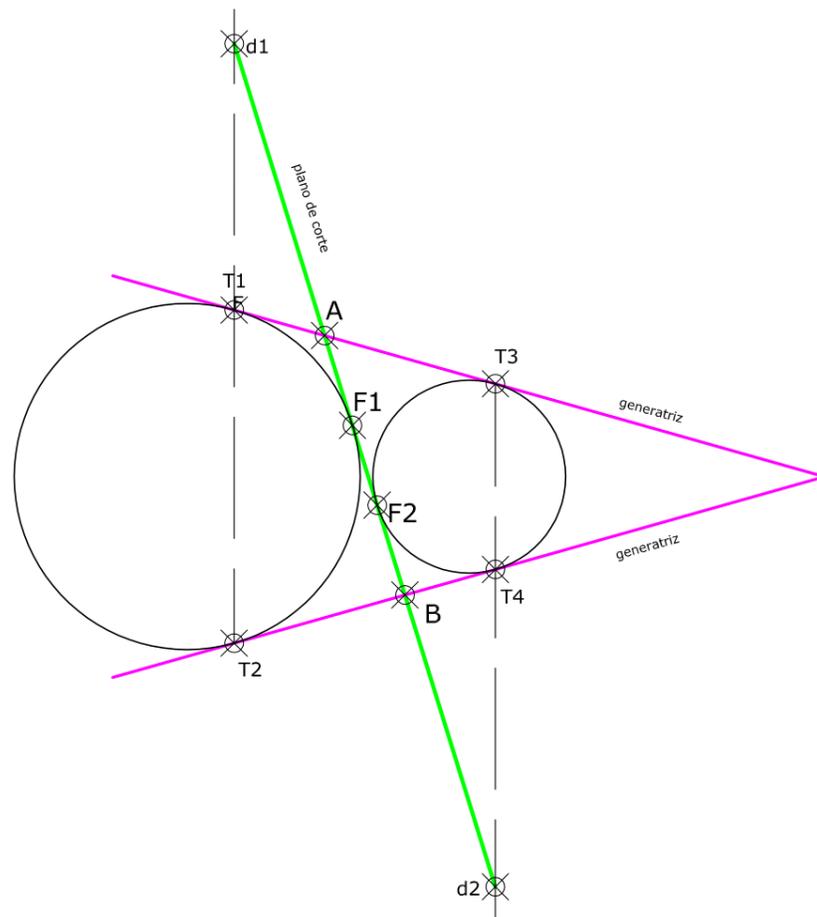
El otro foco se encuentra en la tangencia de la otra circunferencia con el plano de corte.



Teorema de Dandelin en la elipse.

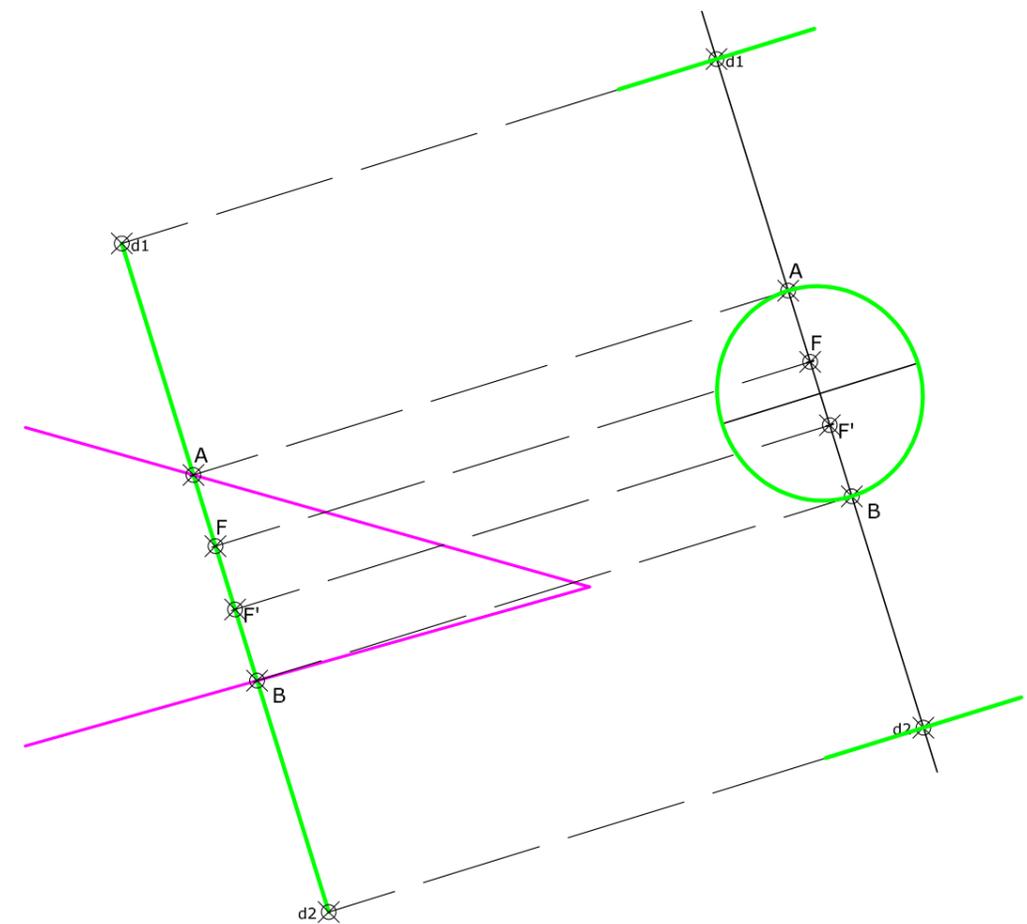
El plano de corte, cortará a las generatrices representadas en los puntos A y B que serán los vértices de la cónica (Fig. 5). Dibujando las circunferencias (esferas) tangentes a la recta que representa al plano de corte, y a las generatrices, se obtienen las dos soluciones dibujadas.

Los puntos de tangencia de las circunferencias con el plano de corte son los puntos F1 y F2 que serán los focos de la elipse. Los puntos de tangencia con la superficie cónica representan a las circunferencias que serían en la solución tridimensional. T1T2 sería una circunferencia y T3T4 sería la otra circunferencia.



Prolongando el segmento T1T2 que sería la representación bidimensional del plano que pasa por la circunferencia, esta prolongación corta al plano de corte en d2 que sería una recta perpendicular al papel, directriz de la cónica. Lo mismo puede decirse de la prolongación de T3T4 que daría d1, la otra directriz de la elipse.

Para mayor claridad de la explicación se abaten a continuación la elipse y los elementos obtenidos, sobre un plano paralelo al de corte.

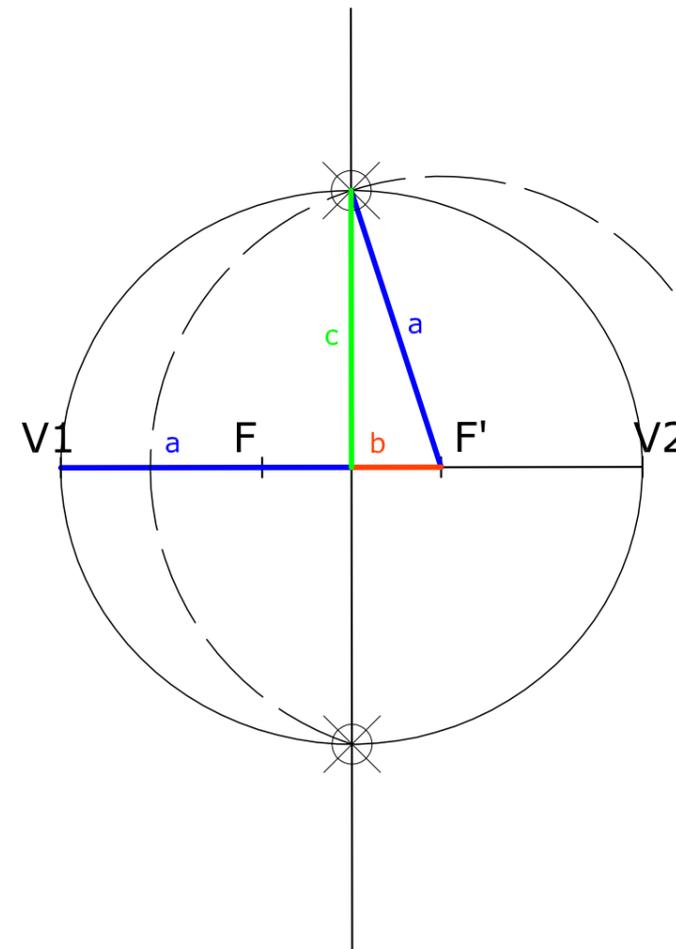
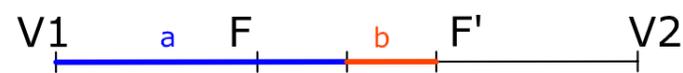


DIBUJO DE LA ELIPSE

Una vez ya conocidos los focos de la elipse gracias al teorema de Dandelin, ya se puede dibujar la elipse que se nos genera.

Los datos que tenemos son: Los focos y la longitud del eje mayor, por lo tanto, sólo resta conocer la longitud del eje menor.

Para el cálculo de este eje usaremos el método grafiado a continuación el cual nos dice que la distancia del vértice al centro es la hipotenusa del triángulo rectángulo que tiene por catetos el semieje menor y la distancia del foco al centro. Puesto que la dimensión del cateto b (distancia del foco al centro) y la de la hipotenusa a ya los conocemos podemos hallar el cateto c (dimensión del semieje menor) y poder trazar la elipse.



6.3. ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR DEL ALA

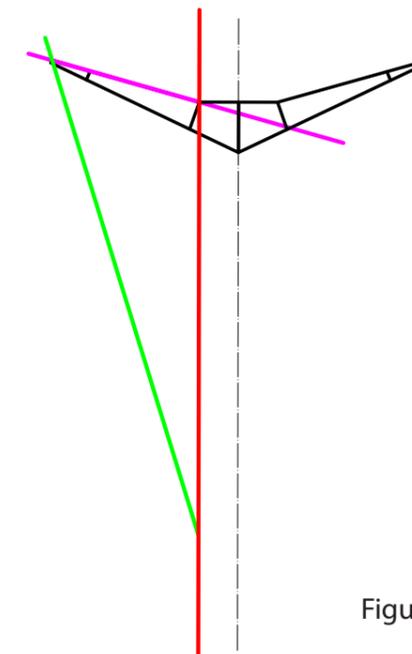
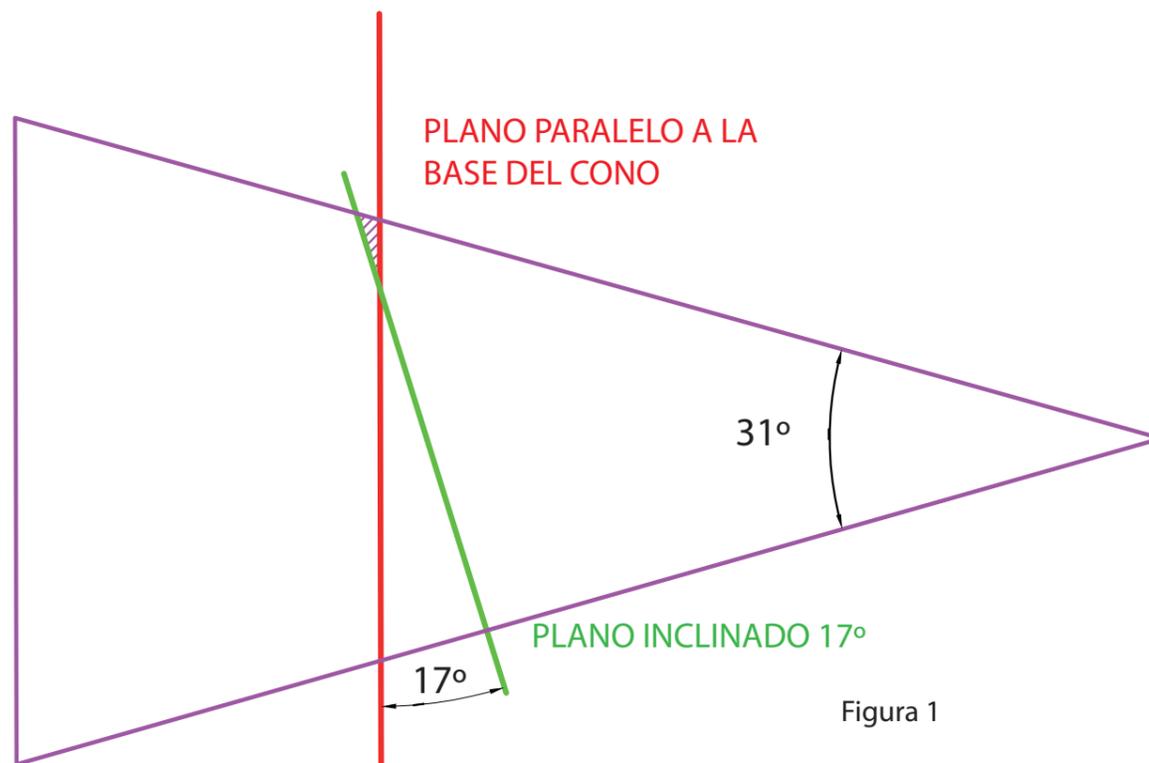
Analizando la curvatura que crea esta superficie hemos llegado a la conclusión de que está formada por un cono de revolución intersectado por dos planos.

El cono que nos crea esta superficie tiene sus generatrices formando un ángulo de 51° .

Los planos que lo intersectan son, uno paralelo a la base del cono, y otro con una inclinación de 17° respecto al plano vertical anteriormente citado.

La parte sombreada es la que corresponde a la superficie de la pluma.

La figura 2 corresponde a la ampliación de la zona sombreada de la figura 1. Esta ampliación se ha solapado sobre la sección transversal de la pluma para indicar cual es la superficie creada por el cono de la figura 1.



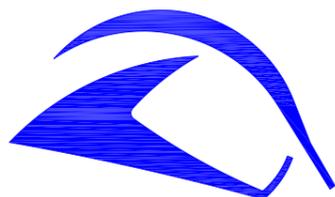
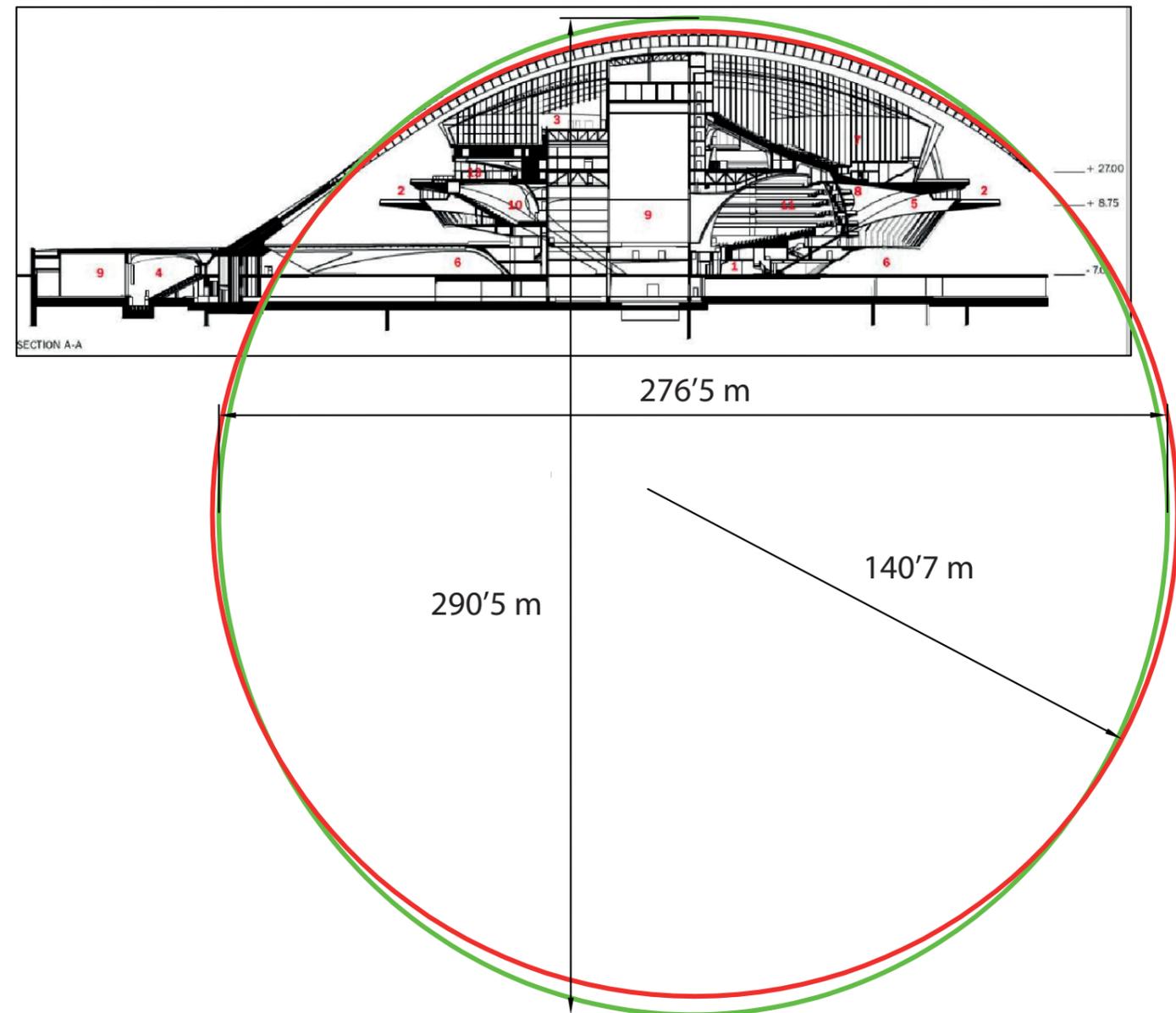
El plano paralelo nos genera una circunferencia (grafada en rojo) al intersectar al cono, mientras que, el plano inclinado nos genera una elipse (representada en verde).

La circunferencia generada tiene un radio de 140.7m.

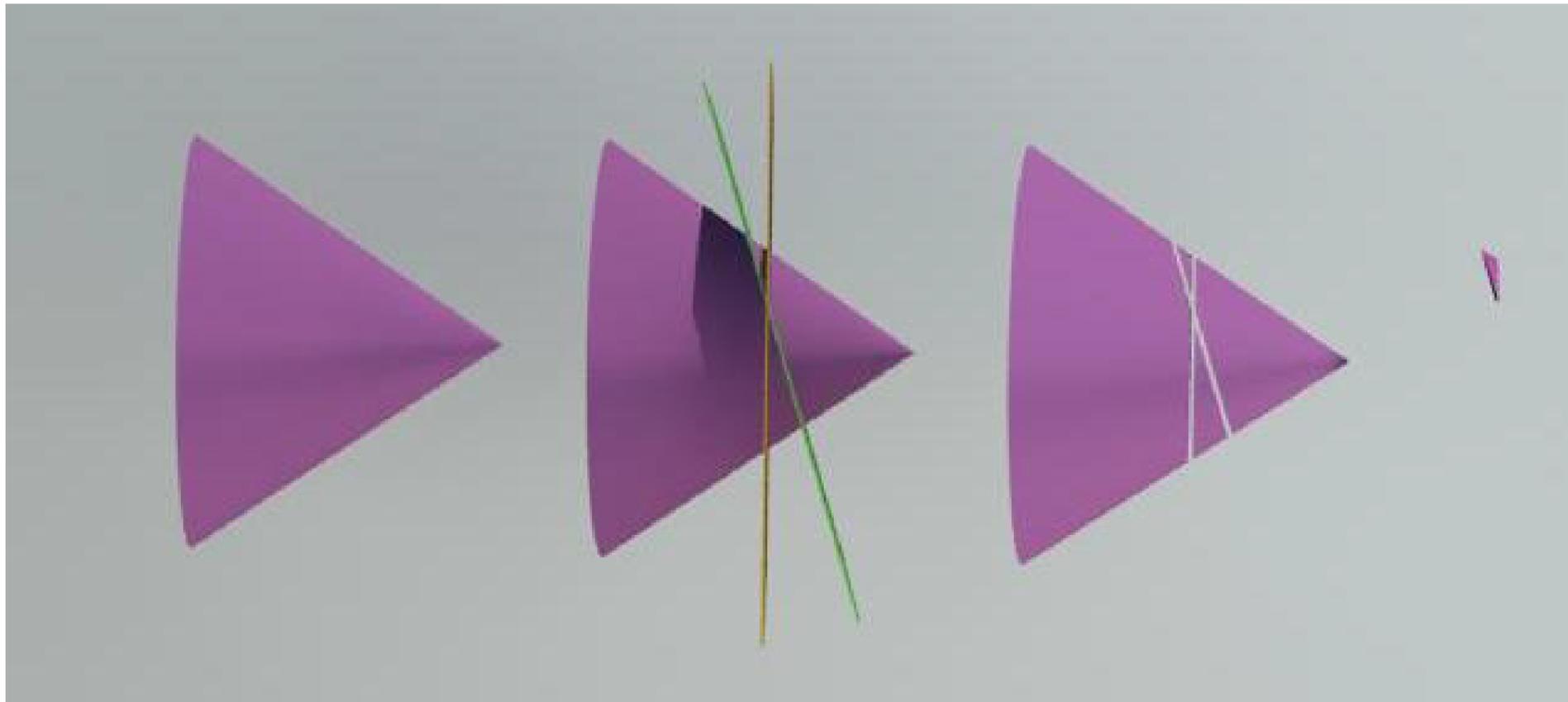
La elipse creada tiene una longitud de eje mayor de 290.5m, y de eje menor tiene 276.5m.

Es debido a estos datos, los de la circunferencia y los de la elipse, que podemos conocer las características del cono de revolución que nos origina esta superficie.

Las dimensiones de la circunferencia y la elipse se han hallado a partir de la sección longitudinal representada en esta imagen.



6.3.1. SECUENCIA OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE SUPERIOR



El primer cono es el inicial.

El segundo está ya intersectado por los planos.

El tercero nos da una imagen del resultado de la intersección de los planos.

La cuarta figura es la solución que íbamos buscando, es decir, la superficie superior de la pluma.



6.4. ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE INFERIOR DEL ALA

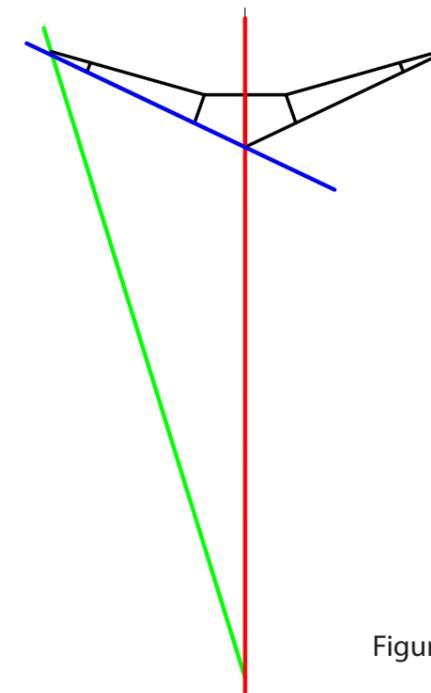
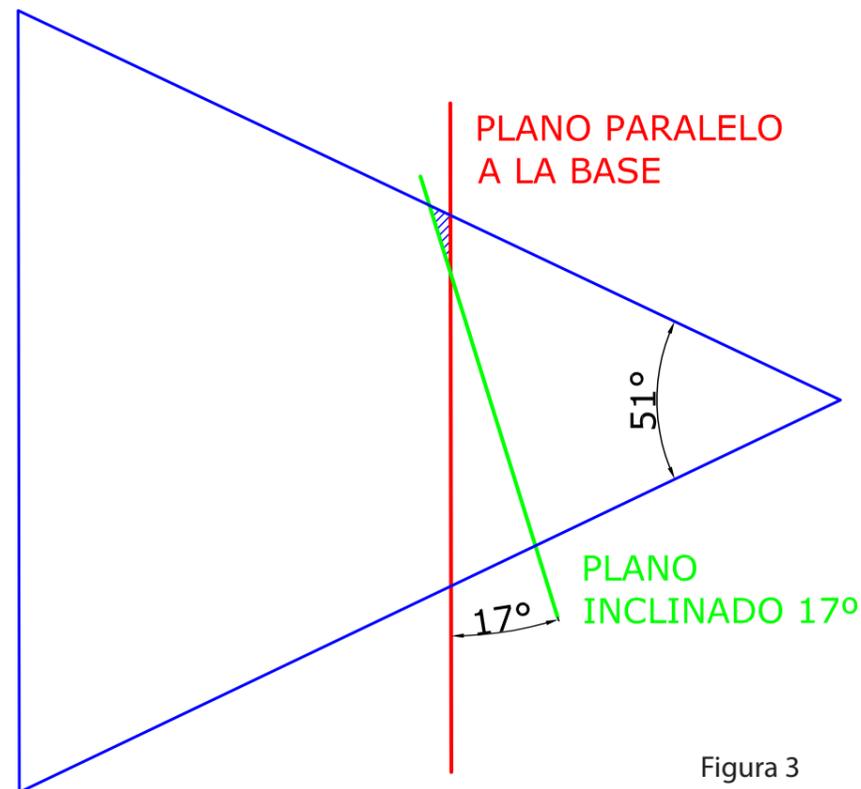
Analizando la curvatura que crea esta superficie hemos llegado a la conclusión de que está formada por un cono de revolución intersectado por dos planos.

El cono que nos crea esta superficie tiene sus generatrices formando un ángulo de 51° .

Los planos que lo intersectan son, uno paralelo a la base del cono, y otro con una inclinación de 17° respecto al plano vertical anteriormente citado.

La parte sombreada es la que corresponde a la superficie de la pluma.

La figura 2 corresponde a la ampliación de la zona sombreada de la figura 3. Esta ampliación se ha solapado sobre la sección transversal de la pluma para indicar cual es la superficie creada por el cono de la figura 4.



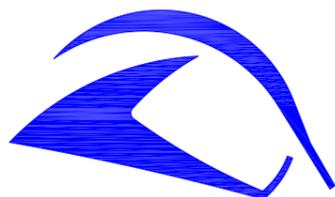
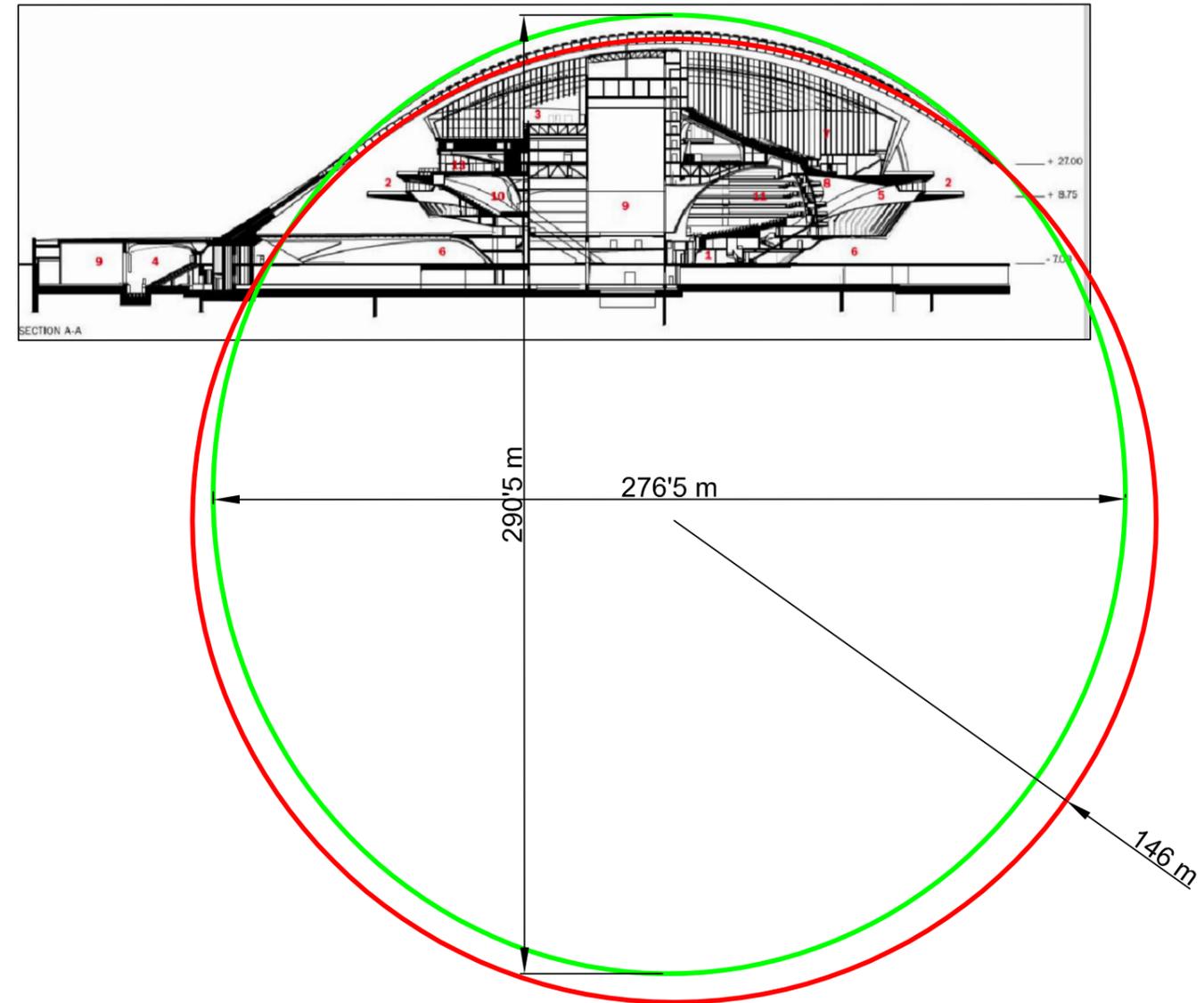
El plano paralelo nos genera una circunferencia (grafada en rojo) al intersectar al cono, mientras que, el plano inclinado nos genera una elipse (representada en verde).

La circunferencia generada tiene un radio de 146m.

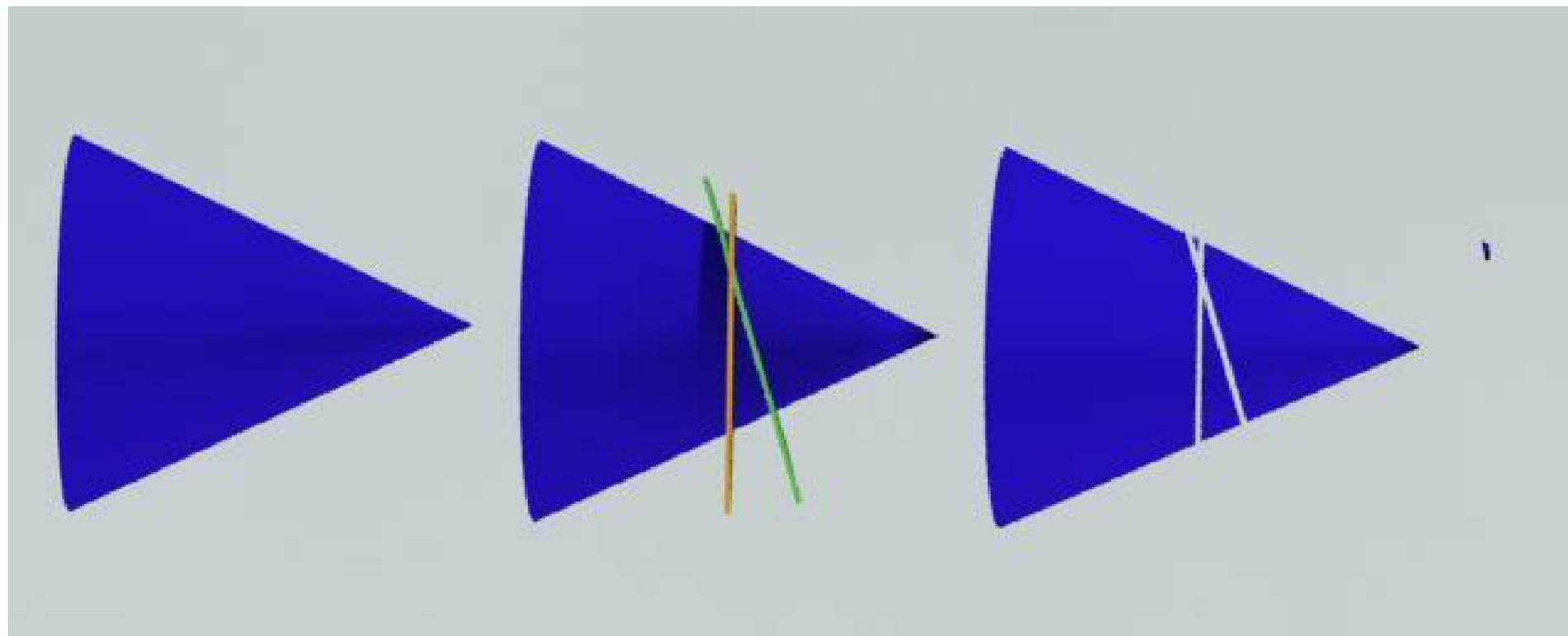
La elipse creada tiene una longitud de eje mayor de 290.5m, y de eje menor tiene 276.5m.

Es debido a estos datos, los de la circunferencia y los de la elipse, que podemos conocer las características del cono de revolución que nos origina esta superficie.

Las dimensiones de la circunferencia y la elipse se han hallado a partir de la sección longitudinal representada en esta imagen.



6.4.1. SECUENCIA OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE INFERIOR

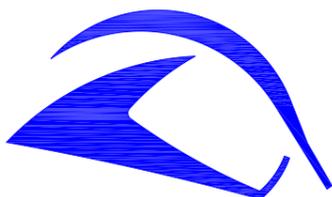


El primer cono es el inicial.

El segundo está ya intersectado por los planos.

El tercero nos da una imagen del resultado de la intersección de los planos.

La cuarta figura es la solución que íbamos buscando, es decir, la superficie inferior de la pluma.

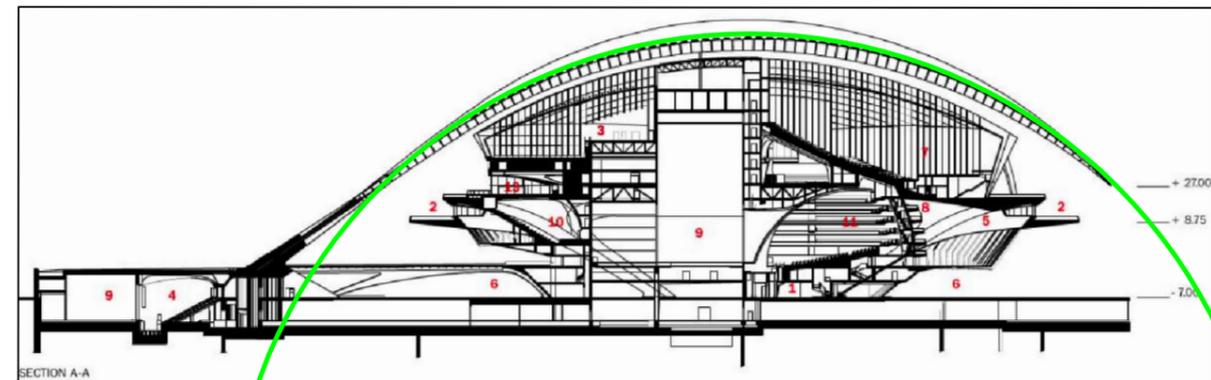
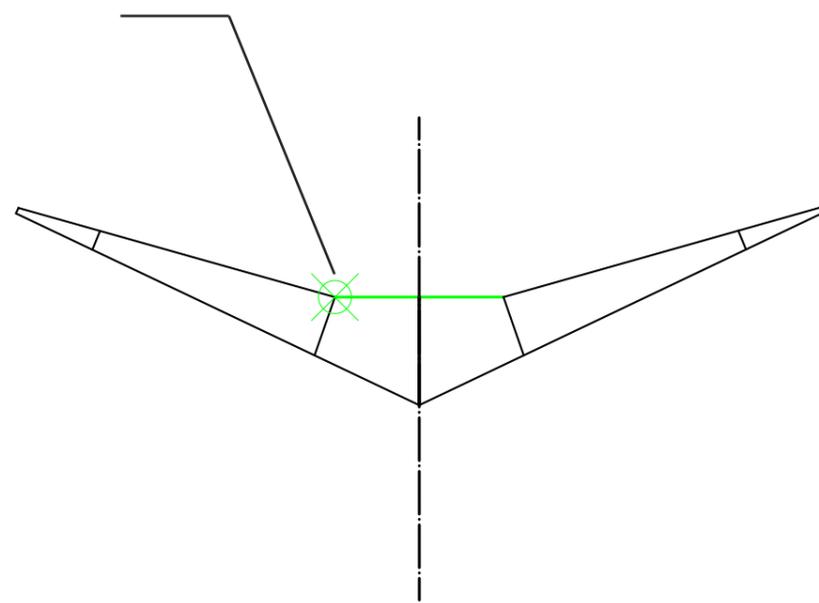


6.5. ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE INTERMEDIA DE LA CUBIERTA

La superficie intermedia corresponde a la generada por un cilindro.

Dicho cilindro posee el mismo radio que la circunferencia que se genera en la superficie superior, puesto que es el punto de intersección del cilindro con el cono que genera la superficie superior.

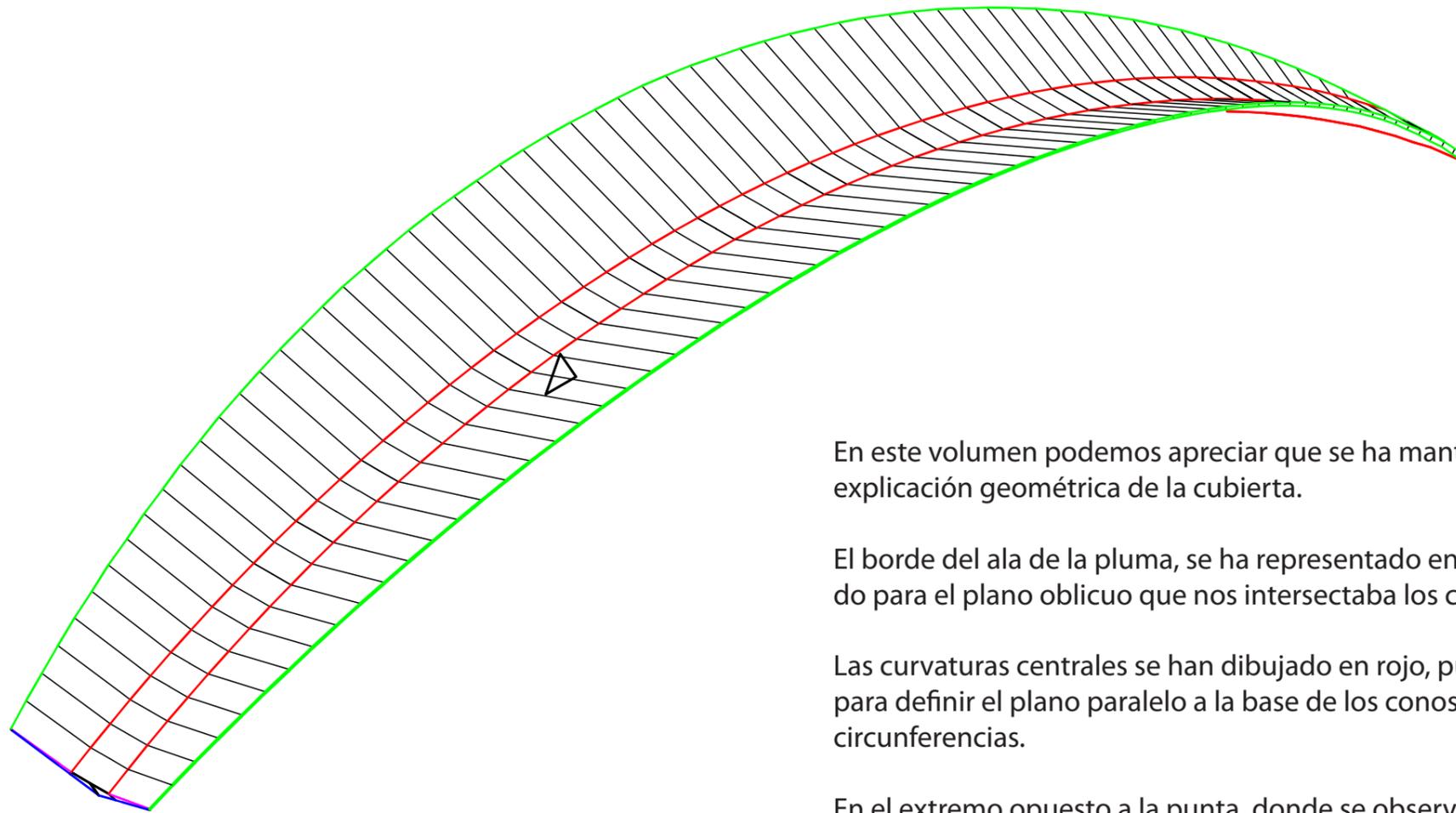
Intersección entre el cilindro y el cono



140.7 m



6.7. VOLUMETRÍA DE LA CUBIERTA



En este volumen podemos apreciar que se ha mantenido el código de colores empleado para la explicación geométrica de la cubierta.

El borde del ala de la pluma, se ha representado en verde, que es el color que se había empleado para el plano oblicuo que nos intersectaba los conos creandonos una elipse.

Las curvaturas centrales se han dibujado en rojo, puesto que, éste ha sido el color empleado para definir el plano paralelo a la base de los conos, que al intersectarlos, nos creaban unas circunferencias.

En el extremo opuesto a la punta, donde se observa la sección de una dovela, se han empleado, para la parte superior, el magenta, que es el color del cono que nos crea la superficie superior, y para la parte inferior, el azul, que es el color del cono inferior.



7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Elemento con una gran complejidad estructural. (aproximadamente, la mitad de la pluma se ha diseñado volada, lo que supone, que se tienen en voladizo aproximadamente 120 metros. Con este dato advertimos la complejidad constructiva de la que hablamos anteriormente, la cual, nos imposibilita profundizar más en este análisis.

El apoyo de hormigón es un elemento de gran particularidad, en su interior se sitúan una gran cantidad de armaduras, las cuales están sometidas a un proceso de postesado, con la finalidad de conseguir una mayor fuerza de sujeción de la pluma, ya que, se trata del soporte que afianza la estabilidad de la misma, mientras que, el apoyo intermedio actúa como punto de apoyo, puesto que, no está sometido a las tensiones de la pluma.

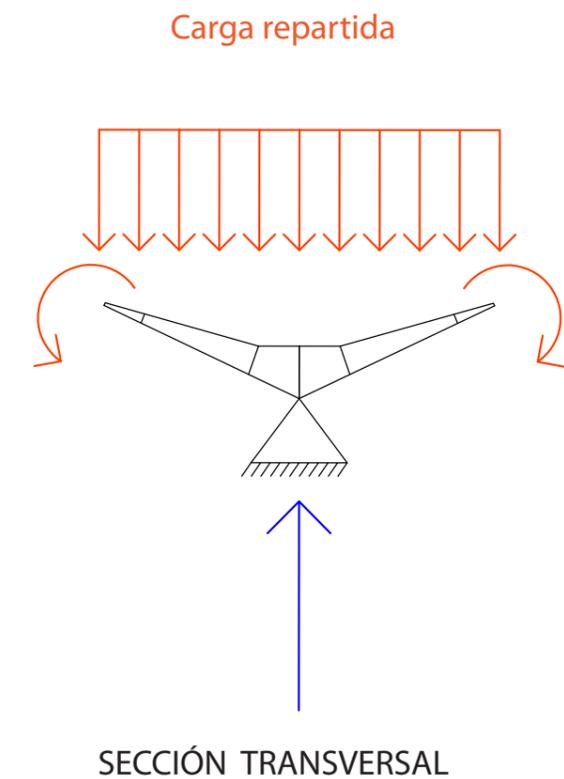
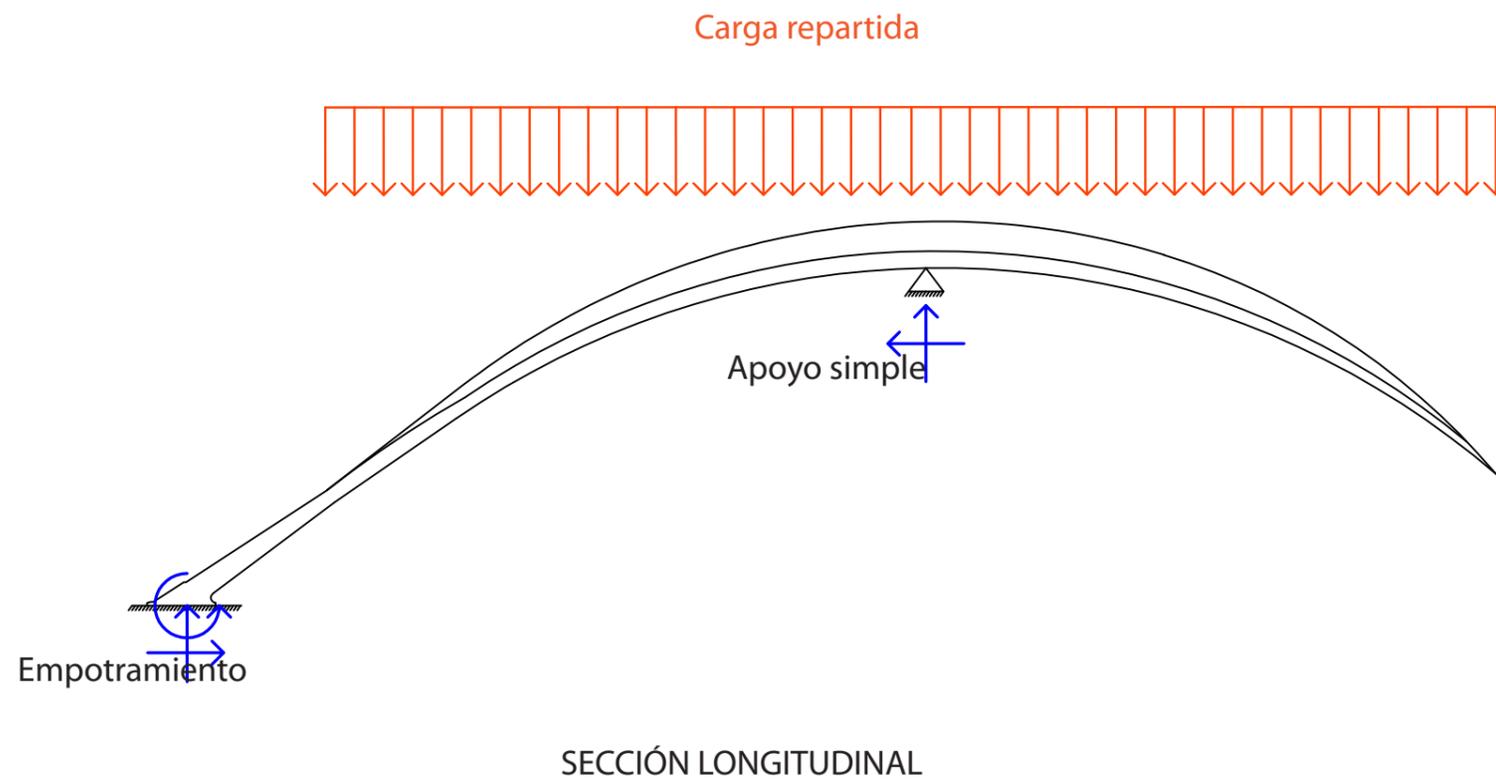


7.1. ANÁLISIS DE LAS CARGAS QUE SOPORTA LA CUBIERTA

Los primeros estudios que se han realizado de la cubierta son los apoyos:

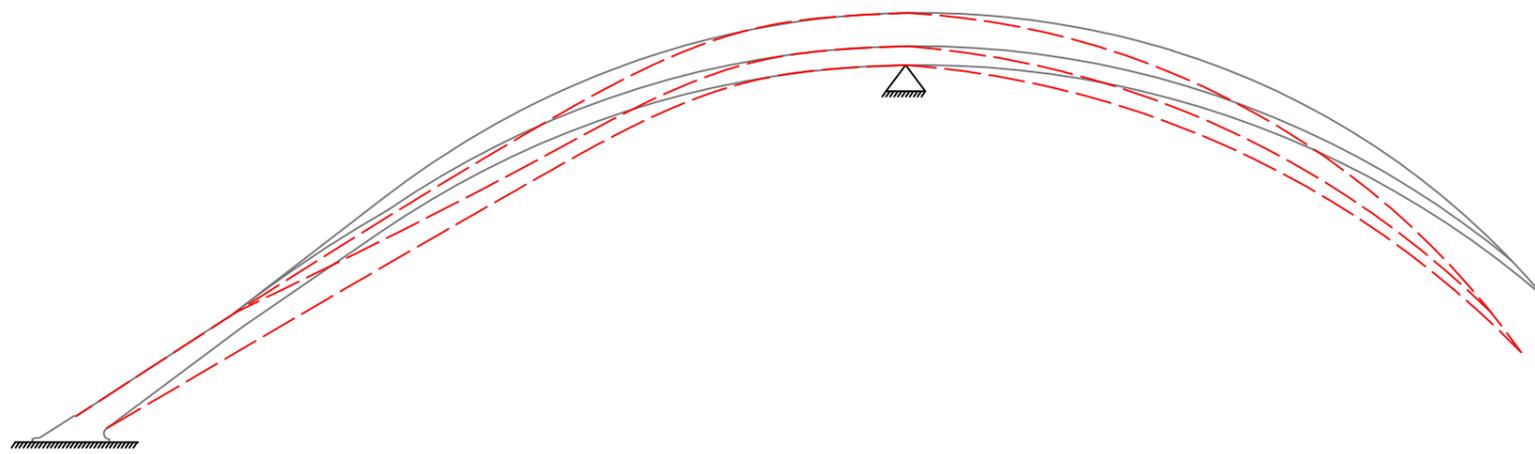
- El apoyo intermedio es un apoyo simple, el cual, nos produce dos reacciones opuestas a las cargas que recibe la cubierta. Estas reacciones son a cortante y a axil.
- El pilono, apoyo inferior, se trata de un empotramiento, con lo cual, se nos generan tres reacciones, las cuales son, a cortante, a axil y a momento.

Las cargas que recibe nuestro elemento son: el peso propio del mismo, la carga de uso, de nieve, y la acción del viento.



7.2. ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES DE LA CUBIERTA

Partiendo de las cargas repartidas que se han indicado anteriormente que debe soportar la pluma, se nos generan las siguientes deformadas.

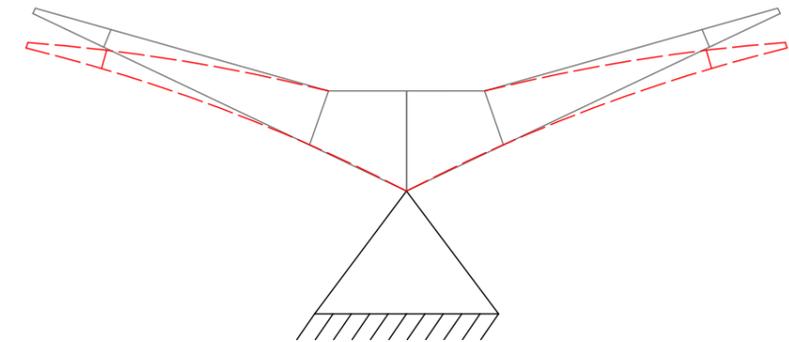


Longitudinalmente, la cubierta se deformaría de este modo

Se ha supuesto este tipo de carga, puesto que, es la correspondiente a la del peso propio de la pluma y a la que recibiría nuestra superficie debido a la nieve.

La parte que más deformaciones sufre es la que trabaja en voladizo.

El tramo que va desde el apoyo simple hasta el empotramiento tendrá una deformación ondulante.



Transversalmente, la deformación la sufren las alas, que debido a su gran dimensión, trabajan como un voladizo.

La deformación se produce desde el encuentro del ala con el núcleo resistente.

Debido a la simetría del elemento las cargas se contrarrestan, evitando así, el giro de la pluma.

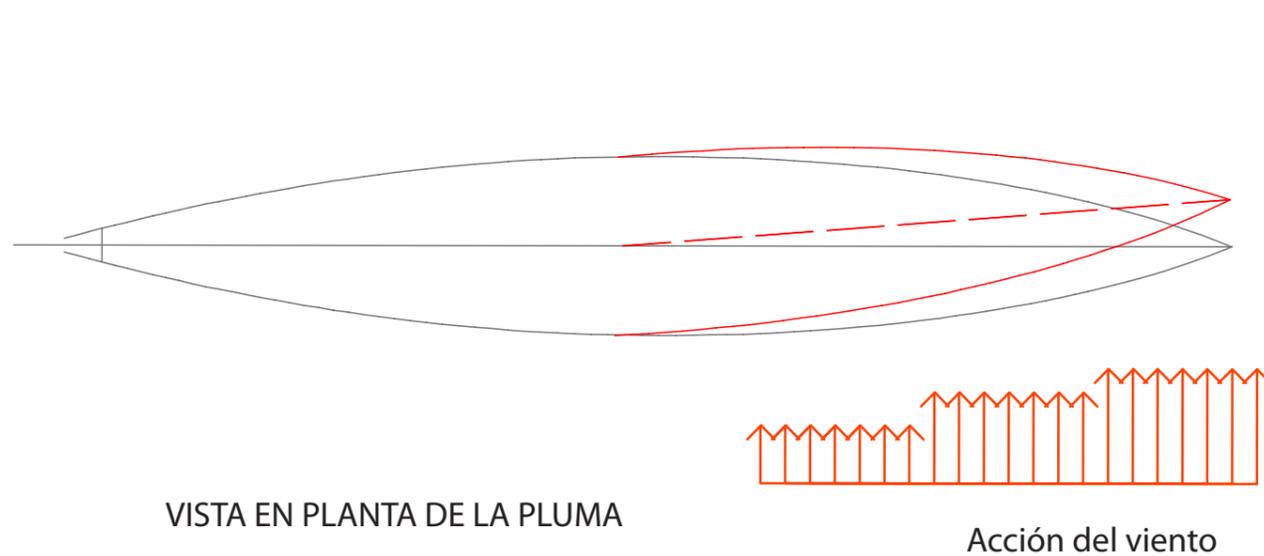
Aún así, este elemento también habrá que calcularlo a torsión, ya que, la acción del viento nos puede ocasionar cargas laterales, las cuales, no se absorberían con el diseño geométrico que posee la cubierta.



7.3. ESTUDIO A TORSIÓN DE LA CUBIERTA

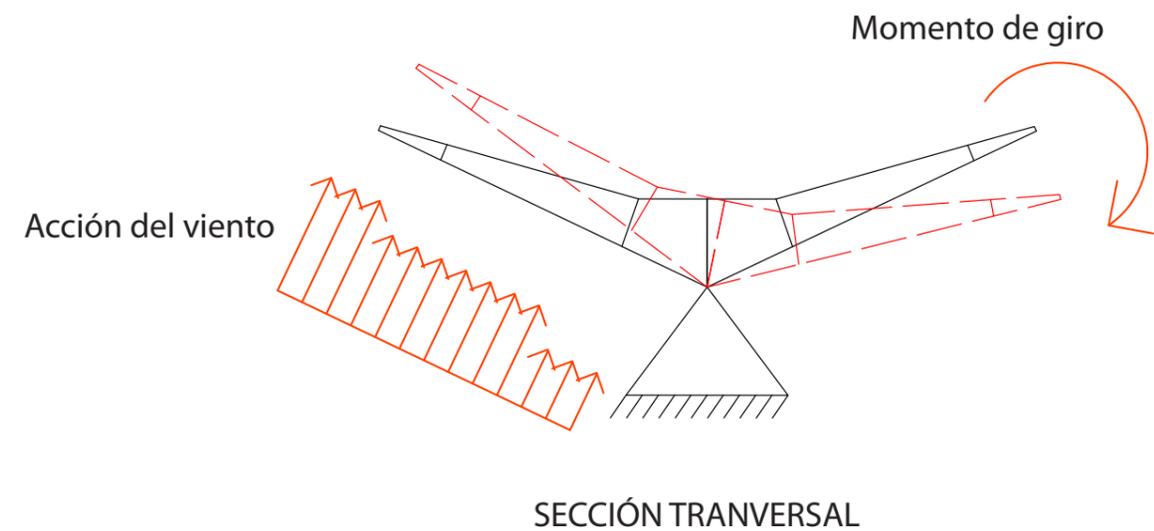
En esta superficie tenemos dos tipos de torsiones debido a las acciones del viento.

Ambas torsiones se contrarrestan debido al núcleo resistente, ya que en este, se crean unas reacciones, que sumadas, han de ser iguales a la resultante del viento.



En esta segunda torsión, el viento nos produce un desplazamiento de la pluma respecto a su eje longitudinal.

Esta torsión se nos produce debido a la forma curva que tiene la cubierta.



En esta primera torsión, la acción del viento nos produce el giro de la pluma.

Esta acción, al final, se traduce en una carga repartida perpendicular a la superficie de la pluma y será mayor en la parte extrema del ala.

Esta torsión es la propia de cualquier elemento longitudinal sin importar la forma curva que posee nuestra cubierta.



7.4. PLANOS

La parte sombreada en rosa es la correspondiente a la formada por el cono superior.

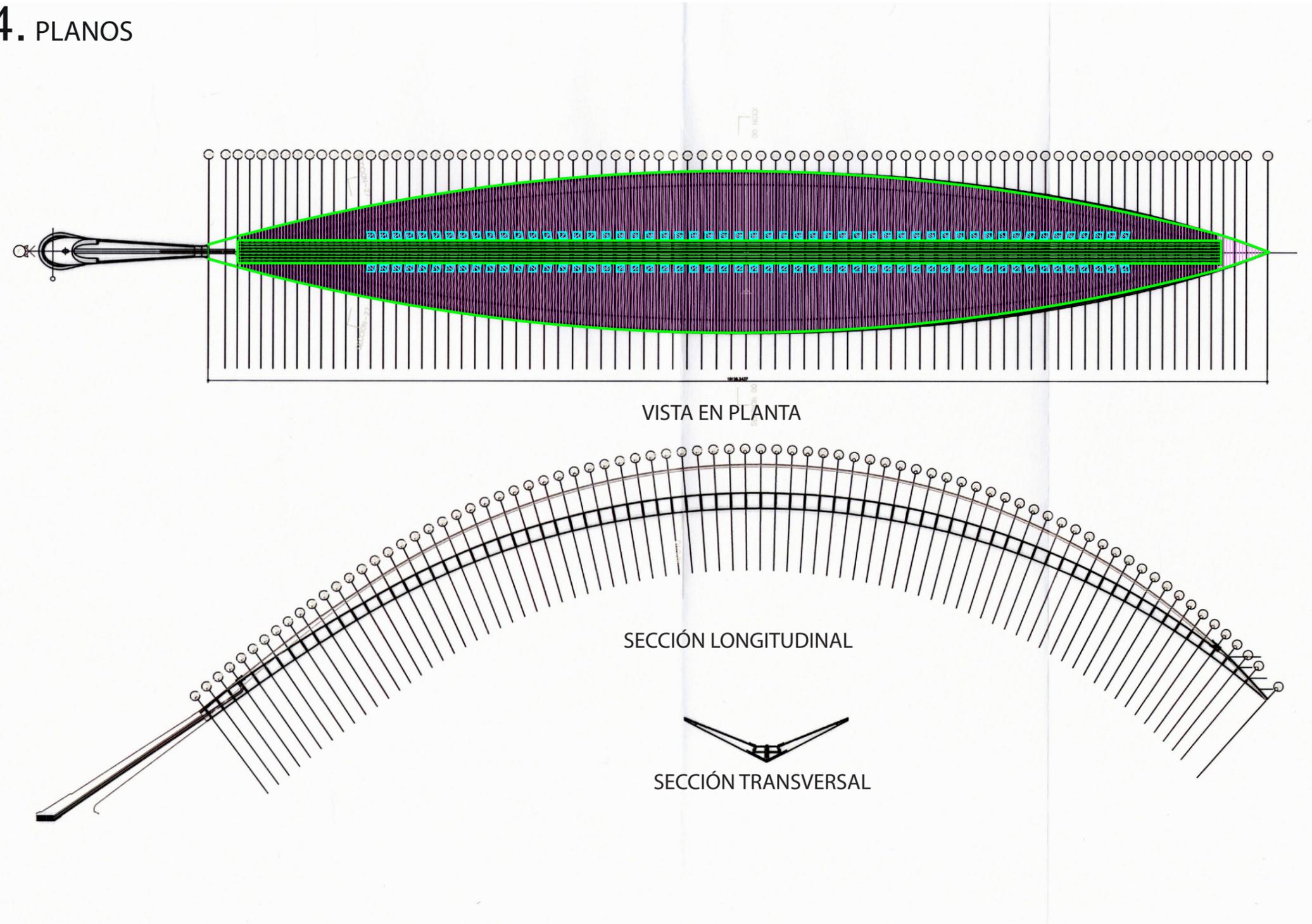
La sombreada en verde, parte central, es la que corresponde al cilindro.

Los recuadros azules corresponden a los lucernarios que existen en la cubierta.

Respecto a dichos lucernarios, cabe decir, que en los planos adjuntos hay grafiados dos más que los realmente ejecutados.

Además estos huecos se han representado diagonalizados, y en la realidad no es así, sino que sólo lo están unos cuantos.

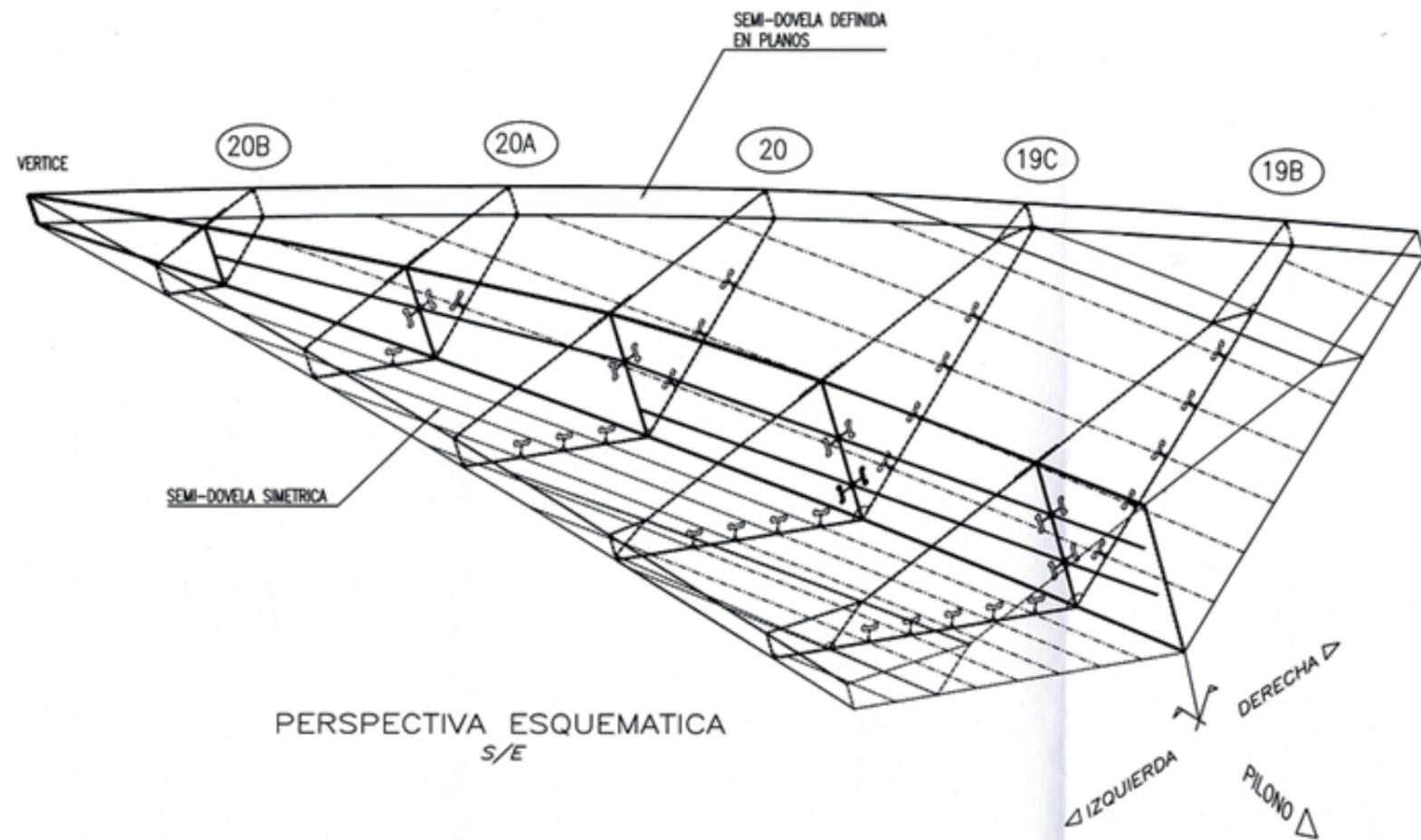
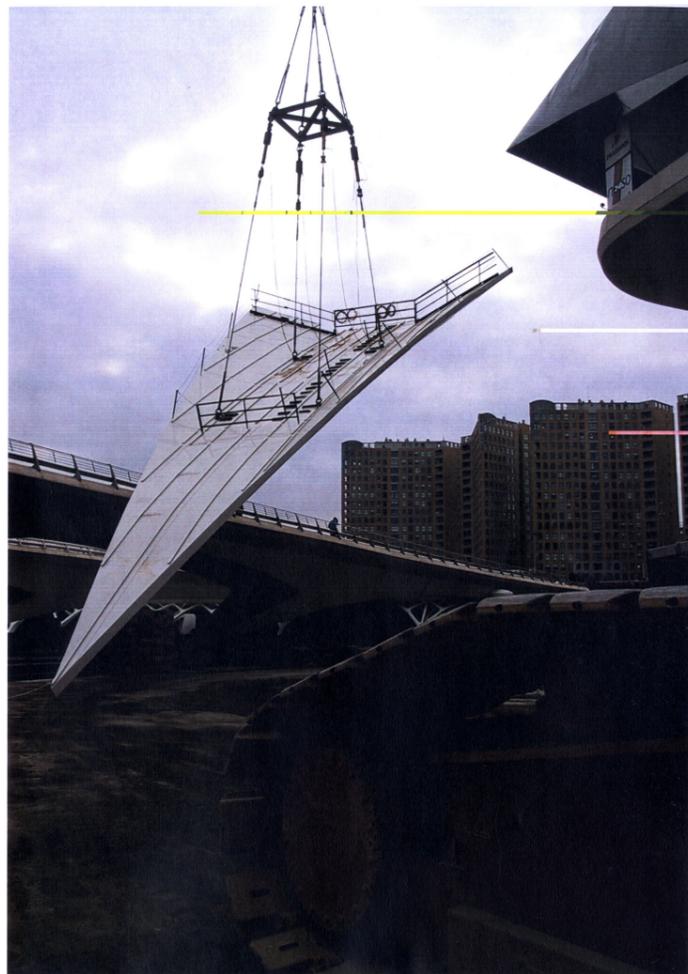
La diagonalización de estos lucernarios se cree que se ha realizado para evitar deformabilidades de los huecos.



Este plano nos detalla la punta de la pluma.

Observamos que está compuesta de cinco módulos.

Por el interior lleva soldados unos perfiles metálicos que suponemos son para dar una mayor inercia a la estructura.

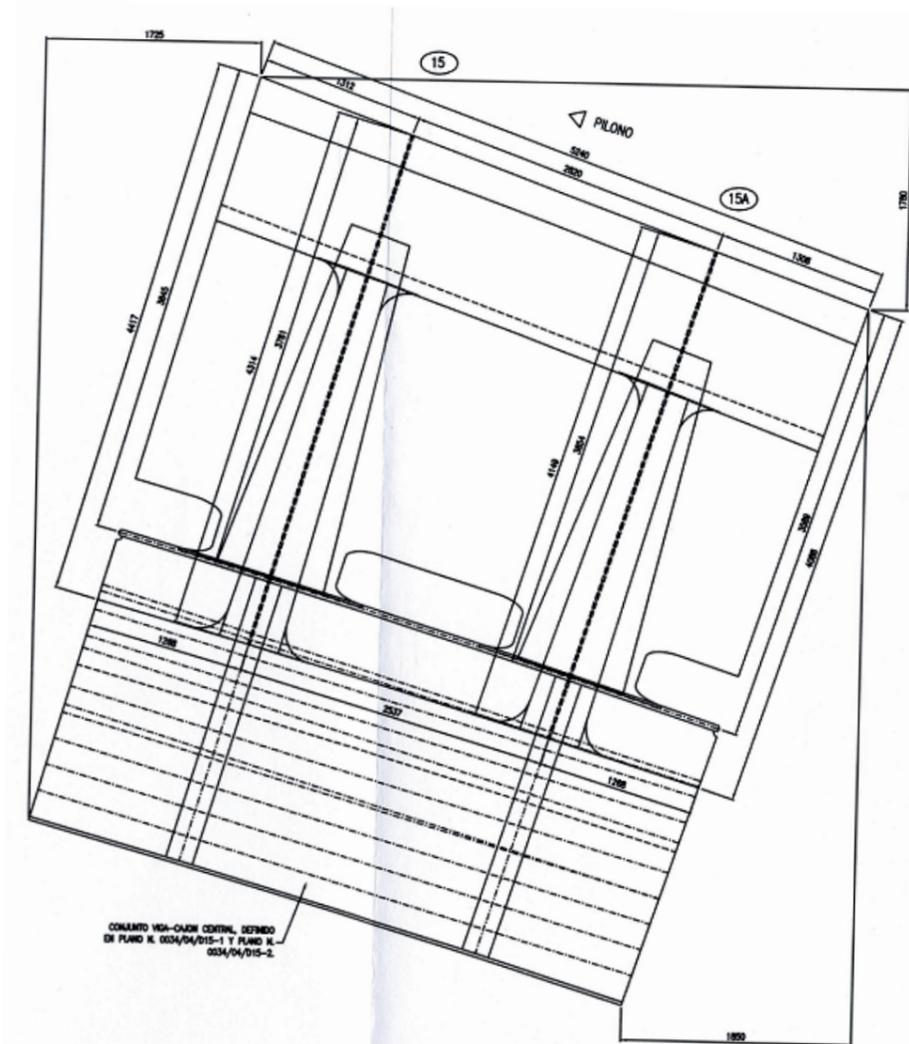
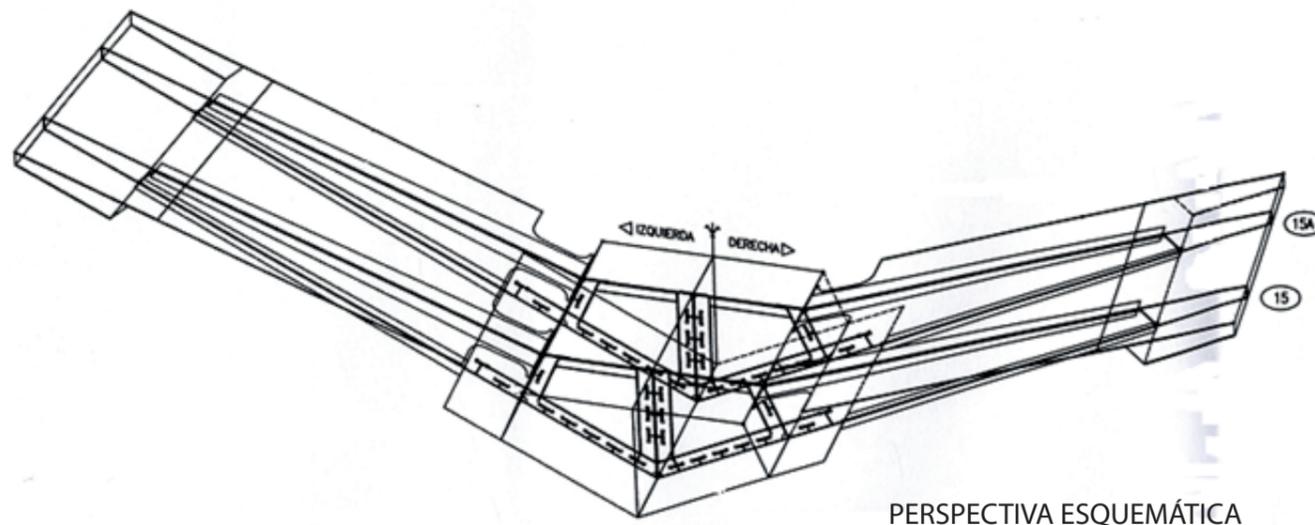


DETALLE DE LA PUNTA DE LA PLUMA EXTRAÍDO DE LOS PLANOS DE DETALLE DE LA CONSTRUCTORA



Plano de detalle de las dovelas 15 y 15a.

En este plano se observa la gran dimensión que tienen las alas de la pluma, razón por la cual, anteriormente hemos llegado a la conclusión de que trabajaban como un voladizo.



DETALLE DOVELA



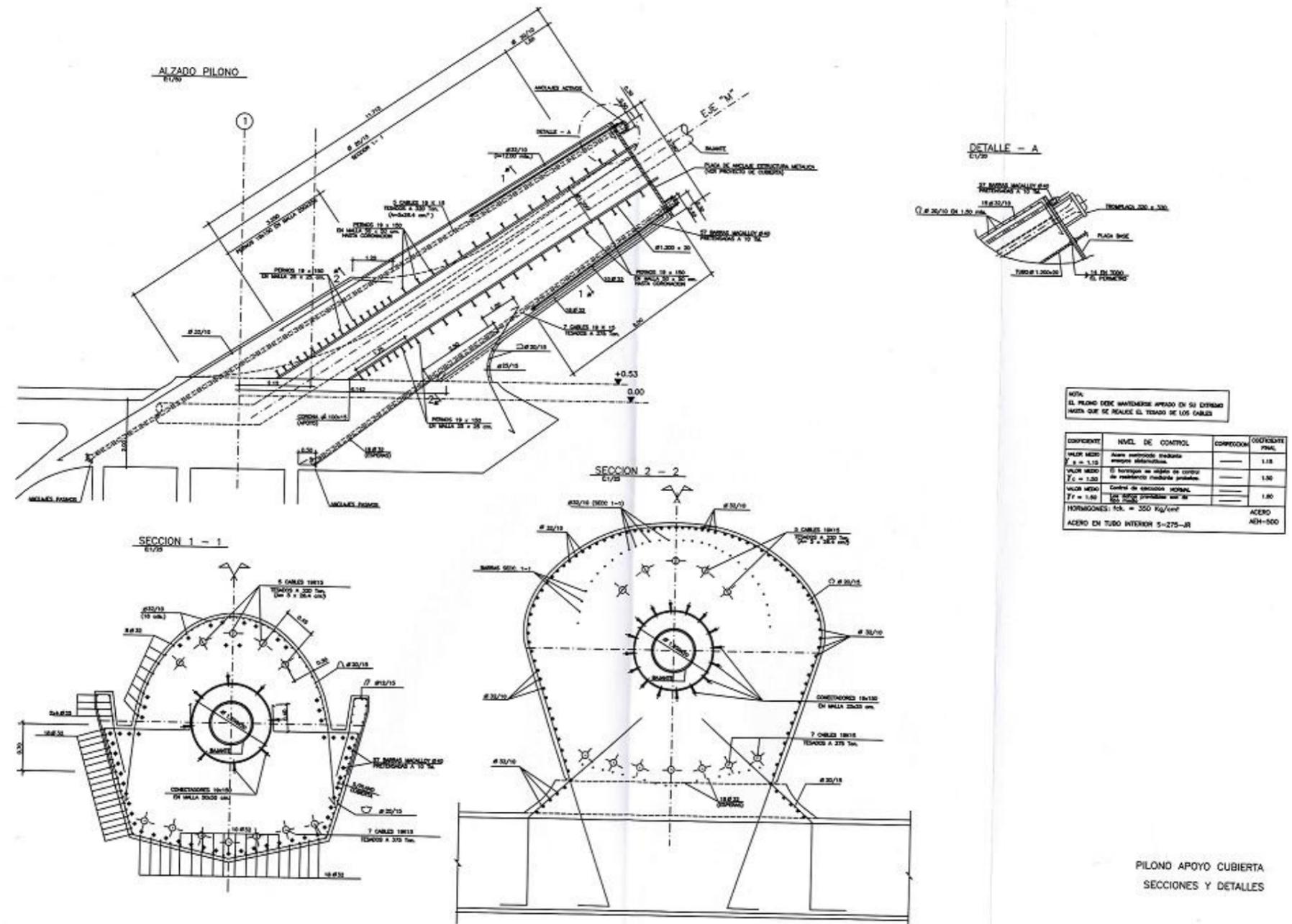
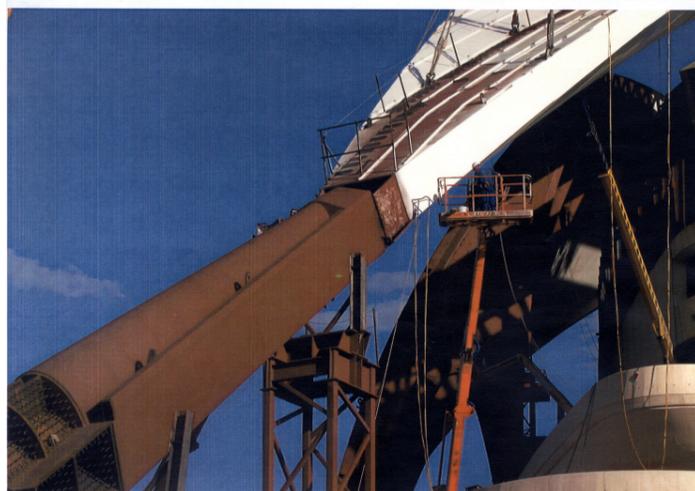
Plano que nos detalla el pilono.

En estos detalles observamos como por el interior del pilono hay una bajante.

Esta bajante es la que recoge las aguas de la cubierta.

Al otro extremo de la pluma, en la punta, existe una bomba de impulsión que recircula el agua hacia el otro extremo, que es donde está colocada la bajante.

Esta recirculación del agua se realiza para evitar la caída libre de la misma por la punta, debido al problema que esto supondría.



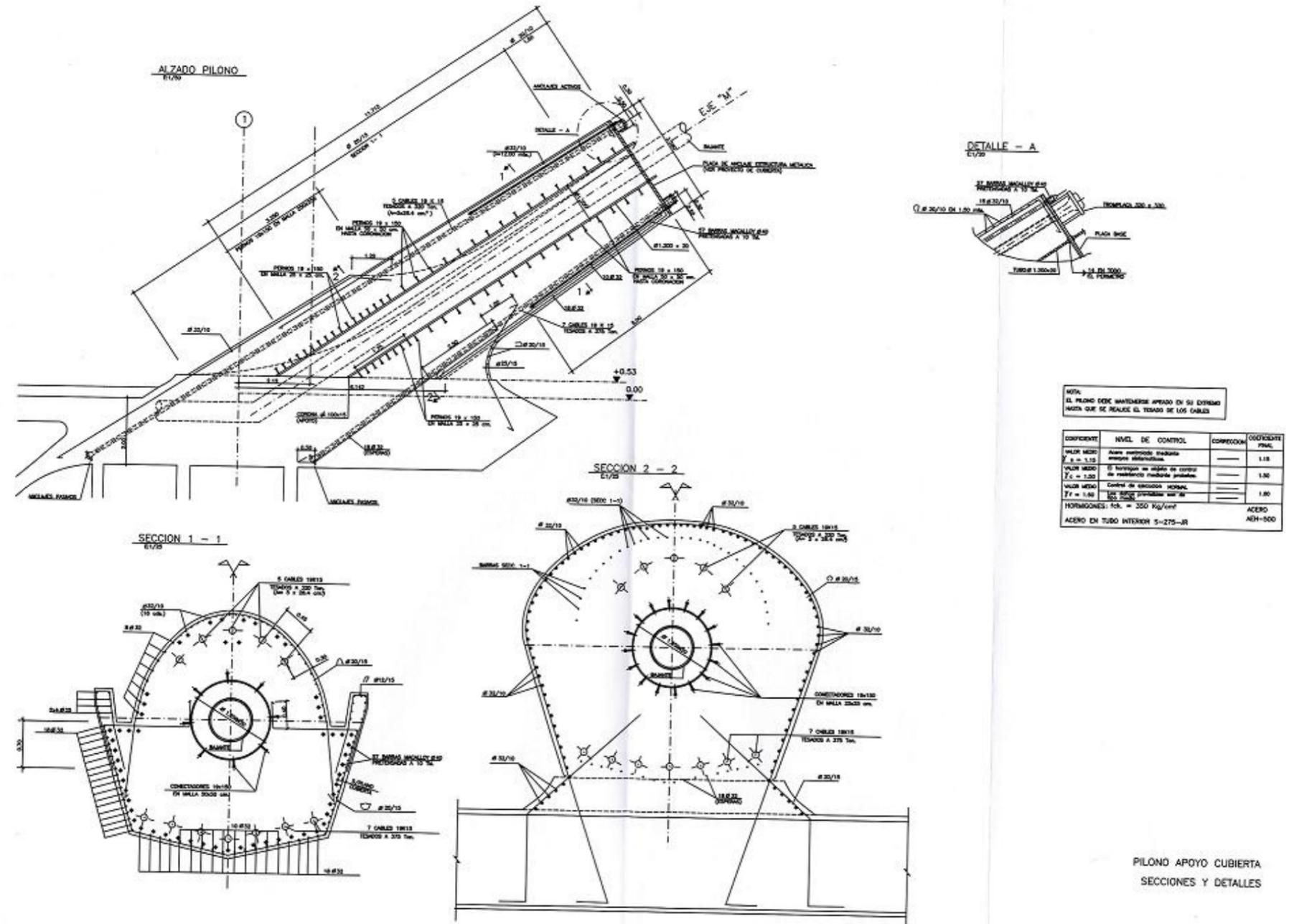
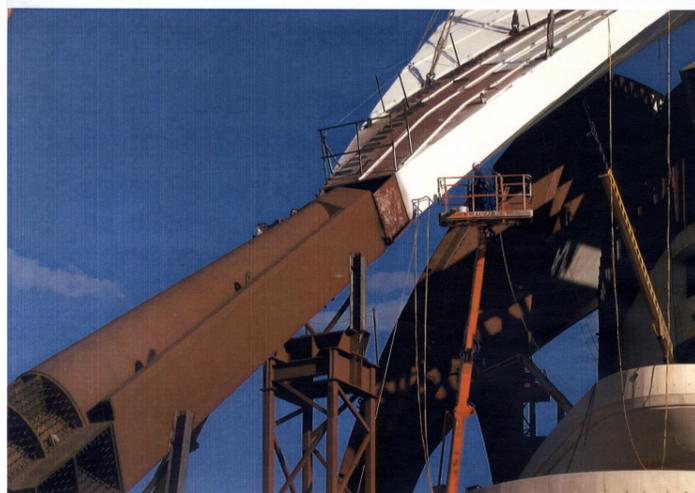
Plano que nos detalla el pilono.

En estos detalles observamos como por el interior del pilono hay una bajante.

Esta bajante es la que recoge las aguas de la cubierta.

Al otro extremo de la pluma, en la punta, existe una bomba de impulsión que recircula el agua hacia el otro extremo, que es donde está colocada la bajante.

Esta recirculación del agua se realiza para evitar la caída libre de la misma por la punta, debido al problema que esto supondría.

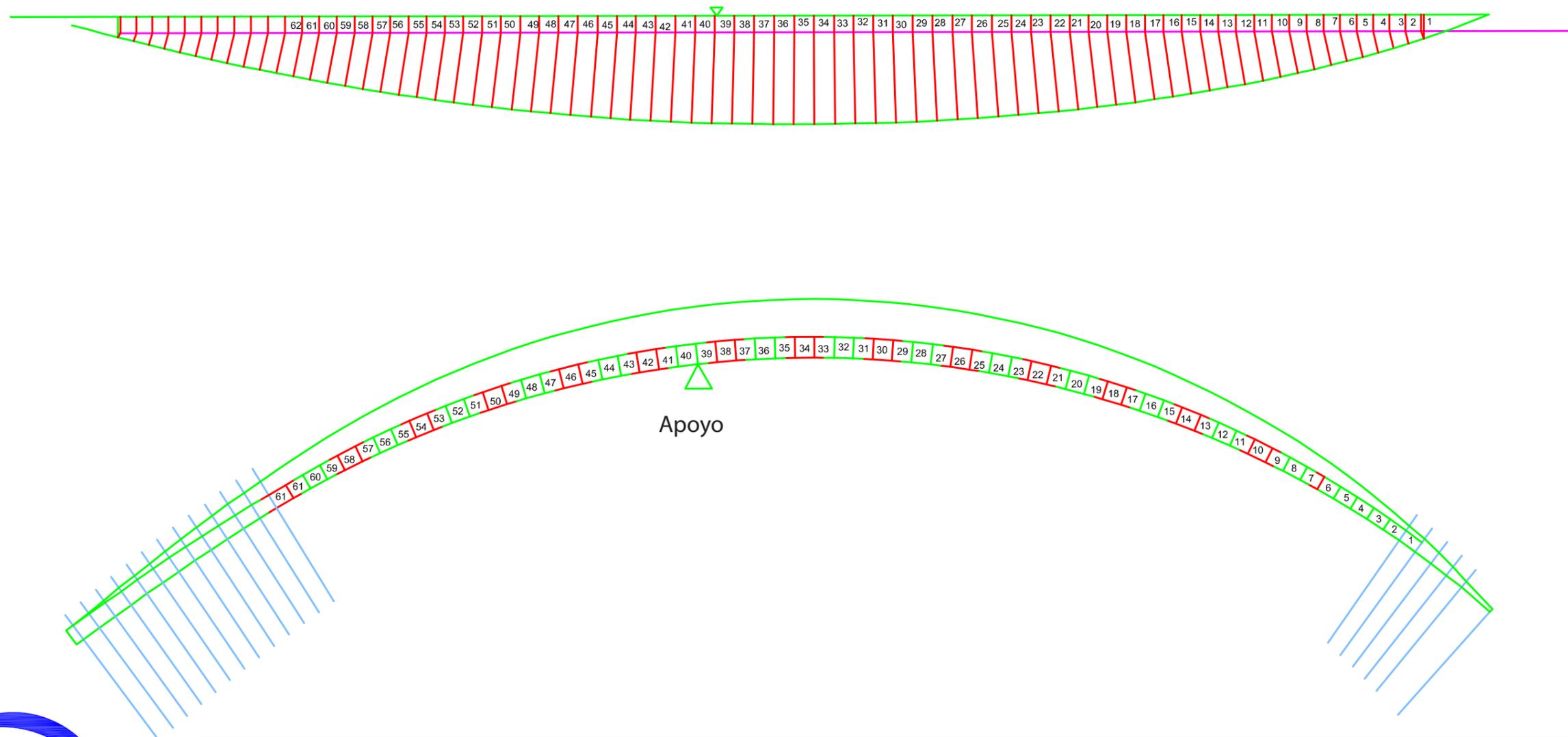


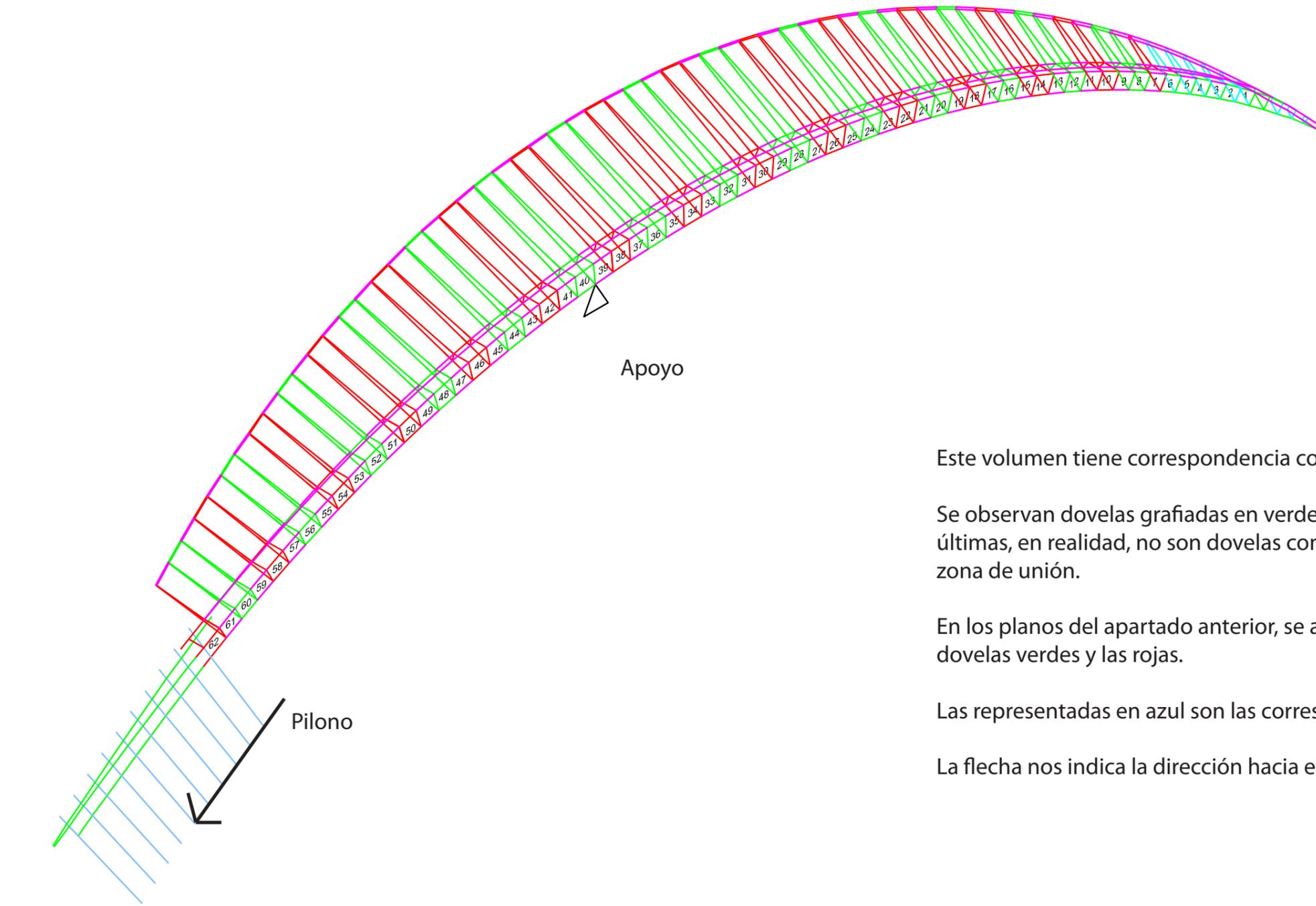
7.5. DESCOMPOSICIÓN DE LA CUBIERTA EN DOVELAS

La cubierta está compuesta por dovelas, las cuales, al unirse crean la curvatura de la misma, es por ello, que serán todas diferentes

Aquí se detallan las dimensiones de cada una, teniendo en cuenta que el análisis se ha realizado con la pluma seccionada debido a su simetría en su eje longitudinal.

El triángulo situado entre las dovelas 39 y 40 corresponde al apoyo intermedio que posee la cubierta.





Este volumen tiene correspondencia con los planos anteriores.

Se observan dovelas grafiadas en verde, rojo y otras en magenta, estas últimas, en realidad, no son dovelas como tal, sino que pertenecen a la zona de unión.

En los planos del apartado anterior, se aprecia donde está la unión de las dovelas verdes y las rojas.

Las representadas en azul son las correspondientes a la punta de la pluma.

La flecha nos indica la dirección hacia el pilono.



8. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

8.1. SECUENCIA CONSTRUCTIVA

En los dibujos adjuntos podemos observar el proceso constructivo de la cubierta resumidos en ocho pasos correspondientes a cuatro diferentes fases de ejecución.

Lo grafiado en rojo en cada imagen es lo que se ejecuta en cada paso.

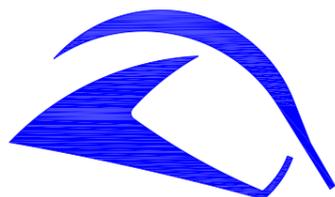
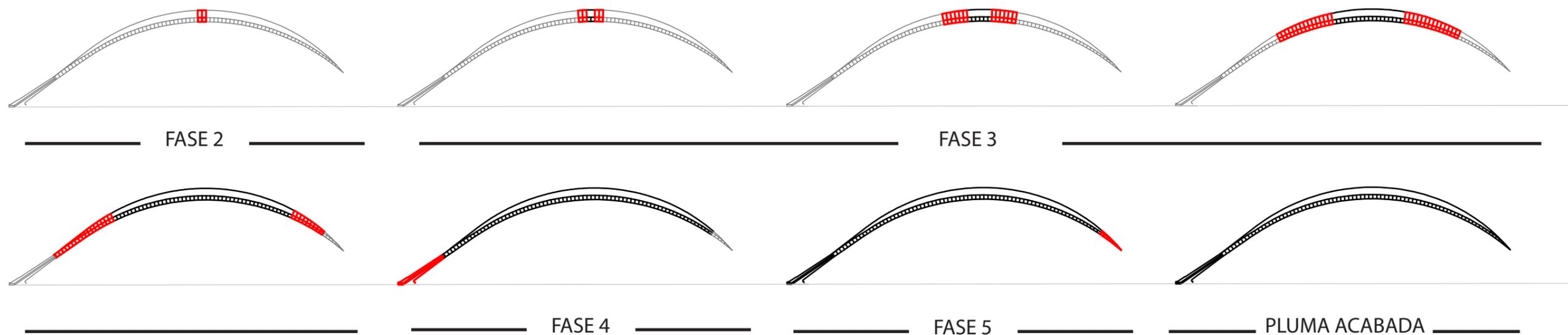
La Fase 1 no está representada en esta secuencia, pero corresponde a la ejecución del apoyo intermedio de la pluma.

En la Fase 2 se colocan las primeras dovelas, las del apoyo.

En la Fase 3 se van colocando el resto de las dovelas de una manera equilibrada por ambos lados.

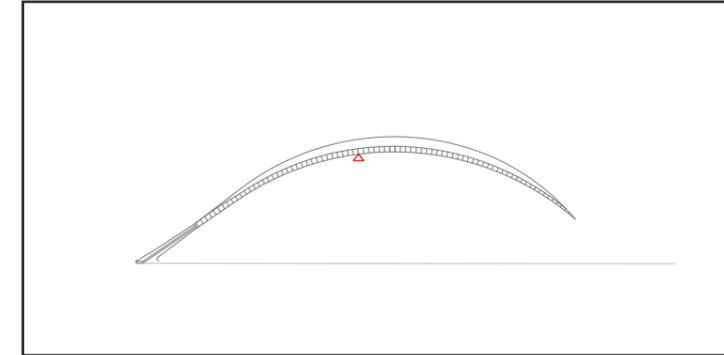
En la Fase 4 se ejecuta el pilono.

En la Fase 5 se coloca la punta de la pluma.



8.2. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO POR FASES

Este análisis se llevará a cabo mediante la secuencia constructiva de la pluma.



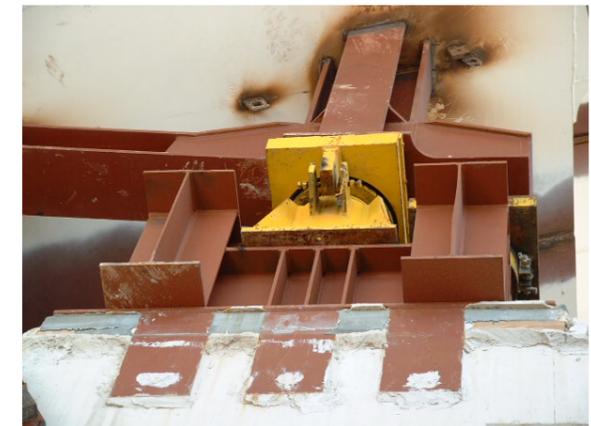
FASE 1. COLOCACIÓN DEL APOYO INTERMEDIO



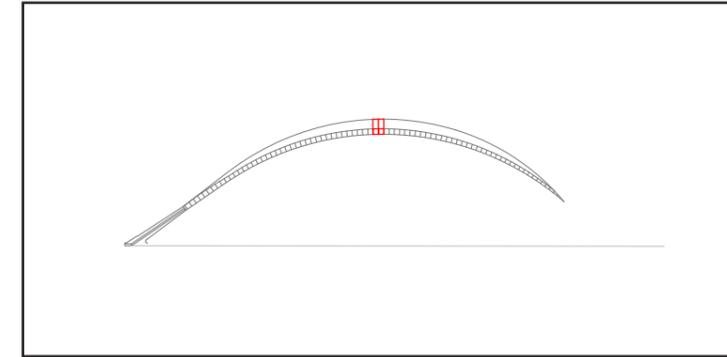
El primer paso de la construcción de la pluma corresponde a la colocación del apoyo intermedio, puesto que, ésta empezará a ejecutarse por la zona central.

Este apoyo es una estructura metálica que actúa en forma de caballete creándole un punto de apoyo a la pluma, ya que, no se considera viable que ésta esté en toda su longitud en voladizo. Tanto por el gran recorrido que tiene como por el gran peso.

Los detalles que se observan a la derecha son provisionales, de manera que, serán retirados quedando únicamente el apoyo central.



FASE 2. COLOCACIÓN DE LAS PRIMERAS DOVELAS.



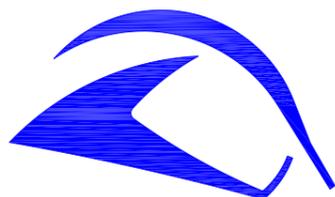
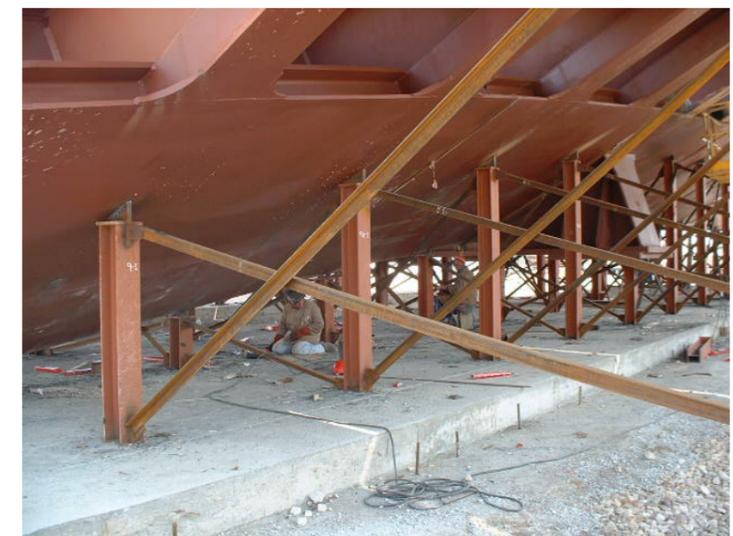
Se inicia la colocación de las primeras dovelas. Las primeras en ser colocadas serán las centrales, es decir, las que irán unidas al apoyo intermedio.

Todas las dovelas, antes de ser hizadas para su colocación, son montadas en el suelo para comprobar que coinciden perfectamente y, así, asegurarse de que no habrá problemas a la hora de ensamblarlas en el aire. Este paso se analiza con más detalle a continuación.



MONTAJE Y COMPROBACIÓN DE LAS DOVELAS EN EL SUELO ANTES DEL HIZADO

- Las dovelas se depositan en una zona acondicionada para poder realizar el montaje de un gran tramo de la pluma.
- Se nivelan y estabilizan, para evitar que se muevan, colocandoles unos montantes metálicos, como se observa en las fotografías.



-Se unen las dovelas que forman el tramo (sin realizar soldaduras) con la ayuda de un equipo de topógrafos, que comprobarán cualquier mínima desviación de las piezas.



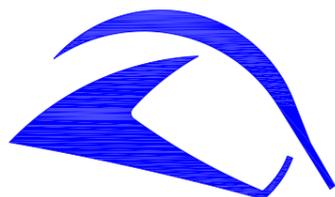
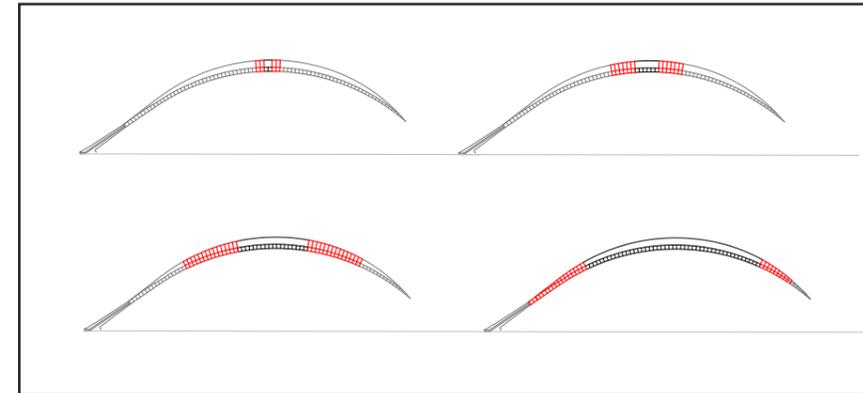
FASE 3. COLOCACIÓN DEL RESTO DE LAS DOVELAS

La colocación del resto de las dovelas se realiza desde el centro hacia los laterales.

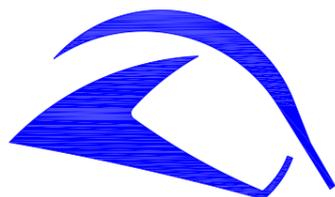
Se irán colocando simultáneamente por ambos laterales para ir equilibrando la pluma.

La unión de las dovelas se realiza mediante soldaduras. El proceso de como se sueldan se analizará posteriormente.

El hizado de los módulos se realiza con grúas, las cuales, estudiaremos en apartado de equipos.



Se observa como se realiza primero el apoyo extremo antes de la colocación de la punta de la pluma.



PROCESO DE UNIÓN DE LAS DOVELAS

- Primero se elevan con las grúas y se sitúan en la posición correspondiente.
- La grúa la mantendrá sujeta hasta que se hayan realizado las soldaduras correspondientes que aseguren la sujeción de la dovela.
- Aún realizadas esas soldaduras, la grúa seguirá sujetando la pieza hasta que se realicen los correspondientes controles de calidad de las soldaduras y se compruebe que están perfectamente realizadas. Los tipos de controles empleados para las comprobaciones de calidad de las soldaduras fueron de líquidos penetrantes y ultrasonidos.
- Una vez obtenidos los resultados de los controles, y siempre que sean favorables, se procederá a soltar la pieza de la grúa, de esta manera, la dovela entra en carga. Para controlar la carga a la que están sometidas las piezas se colocaron sensores de tensiones, los cuales, permitían una lectura en todo momento de las tensiones generadas en la pluma.
- Una vez soltada la pieza se continúa soldando esa misma dovela, puesto que, aún queda una gran cantidad de soldadura por ejecutar.



MEDIDOR DE LAS TENSIONES DE LA PLUMA





OPERARIO SOLDANDO PROTEGIENDOSE DEL VIENTO
PROCEDIENTE DEL MAR



OPERARIOS SOLDANDO POR EL INTERIOR DE LA PLUMA



OPERARIO SOLDANDO LA SUPERFICIE DE LA PLUMA



SOLDADURAS VISTAS POR LA PARTE INFERIOR DE LA PLUMA



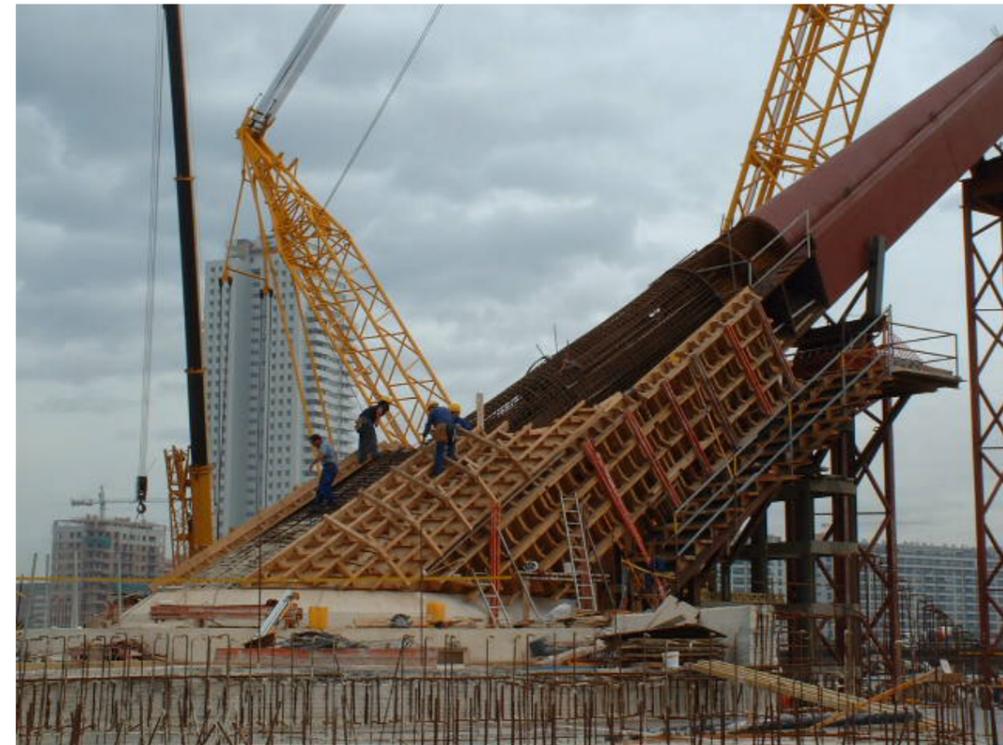
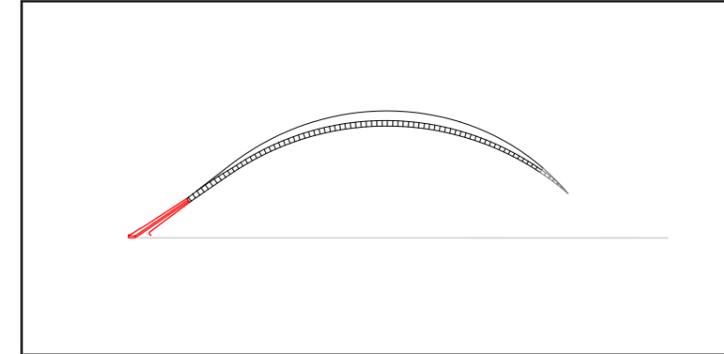
FASE 4. EJECUCIÓN DEL APOYO EXTREMO.

Este apoyo recibe el nombre de "pilono".

Se realiza mediante un encofrado de madera.

Previo al vertido de hormigón se colocarán las armaduras postesadas.

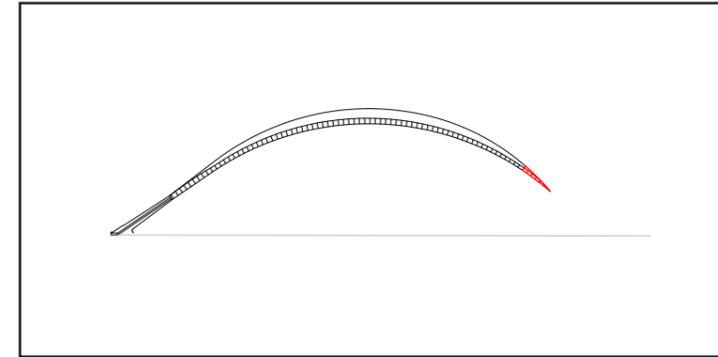
El hormigón empleado para la realización del apoyo fué un hormigón autocompactante debido a la dificultad del vibrado al existir tanta cantidad de armaduras y también debido a la geometría del elemento.



FASE 5. COLOCACIÓN DE LA PUNTA DE LA PLUMA

Este es el último paso a realizar en el montaje de la pluma.

La punta la comprobaremos, antes de su hizado, con la dovela a la que va unida para que, igual que con el resto, se compruebe que coinciden ambas piezas y que la curvatura formada por ellas es la correcta.



FASE 6. COLOCACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

El recubrimiento se cree que está hecho a base de pintura intumescente.

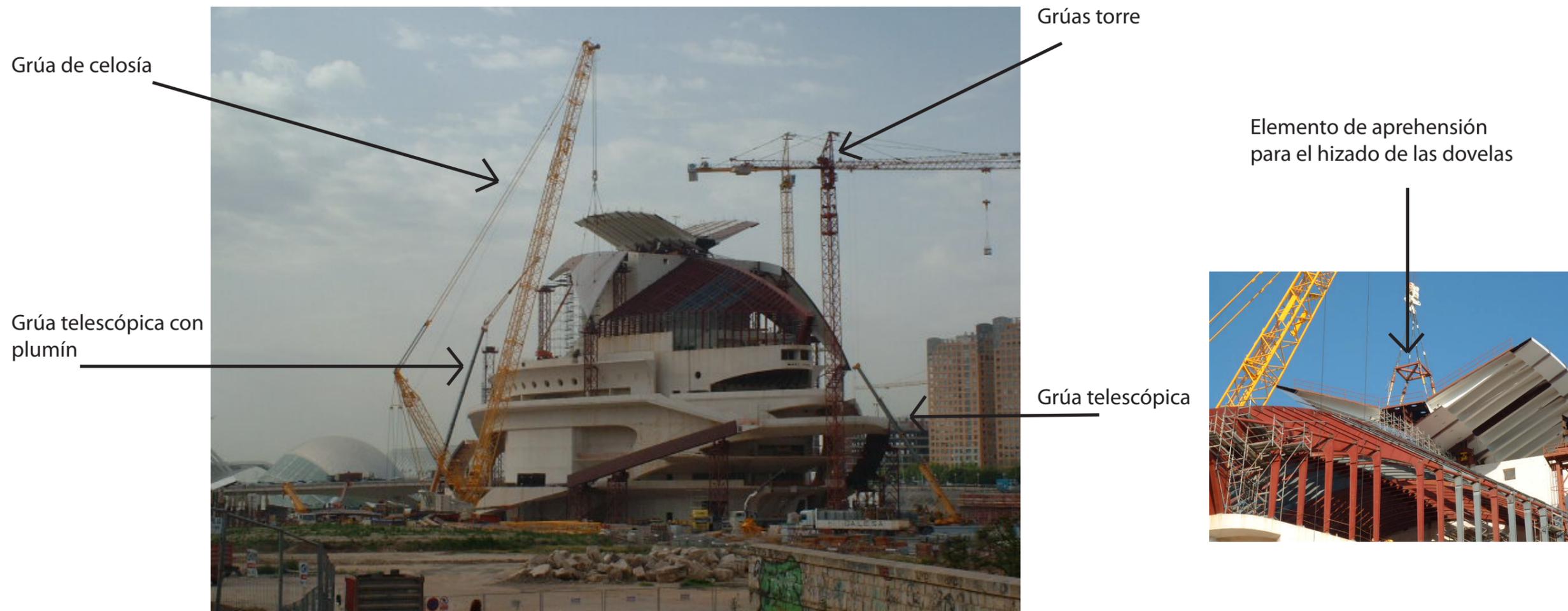
El pintado de la pluma se realizará mediante grúas y andamios.



8.3. EQUIPOS

Para la ejecución de la cubierta se emplearon gran cantidad de grúas de diferentes tipos. En la imagen podemos observar varias grúas torre y una de celosía.

Mediante estos equipos se llevó a cabo la distribución y el hizado de las cargas. Para el hizado de las dovelas, los elementos de aprehensión estaban especialmente diseñados debido a las grandes cargas que debían elevar.



9. CONCLUSIONES

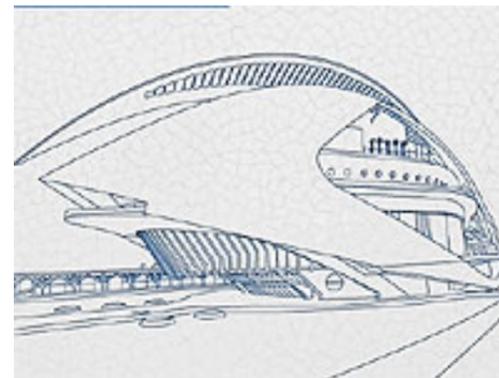
La realización de este proyecto me ha ayudado a conocer en profundidad el elemento que se diseñó como cubierta del Palau de les Arts, además de conocer, de una manera más general, todos los componentes de la Ciudad de las Artes y las Ciencias.

El hecho de haber dedicado un espacio para hablar de Santiago Calatrava me ha servido para conocer más a fondo a este arquitecto así como su interesantísima trayectoria profesional.

La gran dificultad que se me ha presentado a la hora de encontrar información sobre este elemento me ha impedido poder tratar más en profundidad algunos temas.

Aún así, los datos y conclusiones que aparecen en el proyecto están debidamente fundamentadas a partir de los análisis de las informaciones que, finalmente, he podido conseguir.

Como conclusión de este trabajo he de decir que me ha resultado muy interesante, y no solo por llegar a conocer en profundidad un elemento tan peculiar, tanto estructural como geométricamente, sino también por el hecho de haber ampliado mis conocimientos geométricos y estructurales.



10. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

PÁGINAS WEB

BOIRA MARQUES, Josep. V. *Valencia la ciudad*. Tirant lo blanch. 2010

www.cac.es

JODIDIO, Philip. *Santiago Calatrava: Complete works*. Taschen. 2007

www.unilinesafety.com

TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava: Obra completa*. Poligrafía. 2007

www.ciutatdelesarts.com

VV.AA. *Valencia*. Everest. 2004

www.web-valencia.com

VV.AA. *Valencia (Guirama)*. Anaya Touring. 2008

www.portalvalencia.net

VV.AA. *Ciutat de les arts i les ciencies*. S.L. Dos de arte ediciones. 2003

WELLMAN L.B. *Geometría descriptiva*. Reverte. 1987

YAYA TUR, Javier. *Ciutat de les arts i les ciencies*. Ciutat de les arts i les ciencies (vol.1) D.L. 2006

