

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DEL MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO EN NITEROI (O. NIEMEYER)

Autor: Soler Gómez, Víctor

Tutor: Fenollosa Forner, Ernesto Jesús



La estructura es el soporte de los edificios y construcciones, su esqueleto, lo que hace físicamente posible la existencia de la arquitectura. La finalidad última de la arquitectura es ser construida, construir aquello que se proyecta, para poder ser utilizado, para poder vivirlo, aprovecharnos de lo que nos ofrece y, en definitiva, que tenga sentido. No se puede concebir la arquitectura sin la presencia de la estructura.

Pero no debemos entender la estructura como una disciplina distinta, diferente de la arquitectura, sino como una parte de ella. Más allá de una solución para que el edificio se tenga en pie, la estructura es un recurso con el que proyectar, con el que diseñar la geometría, las formas, una herramienta con la que organizar las funciones del edificio, los espacios, las sensaciones, la incorporación de la luz, etc.

La estructura debe formar parte de la idea generadora del proyecto, tanto como el lugar, el programa, la función, la orientación etc, ya que va a condicionar en gran medida el resto de los aspectos del edificio. No podemos diseñar un edificio y después asignarle una estructura, sino que la estructura nace en la fase inicial del proyecto y evoluciona con él.

Meditar sobre los esquemas estructurales, sobre las características de los materiales, tener en cuenta la experiencia propia y ajena, es un acto de amor hacia el acto de construir en sí y por sí.

Pier Luigi Nervi. Estructuras

Es absurdo descender a la concreción cuantitativa sin la seguridad de tener encajado el conjunto en sus acertados dominios. Es un error demasiado corriente empezar a calcular la viga número 1 sin haber antes meditado si la construcción debe llevar vigas o no.

Eduardo Torroja. Razón y ser de los tipos estructurales



RESUMEN

El museo de Arte Contemporáneo de Niterói, proyectado por Oscar Niemeyer en 1991, es una obra maestra de la arquitectura contemporánea. Influenciado tanto por las corrientes puristas de Le Corbusier, como por las formas orgánicas de Wright, Niemeyer diseña este museo circular en el que sintetiza sus ideas arquitectónicas.

El museo destaca especialmente por el alarde estructural. Un cilindro central soporta el peso de toda una estructura radial de hormigón con importantes voladizos y grandes luces. Esta estructura formada por vigas de gran canto se sirve de mecanismos de diseño estructural y de la propia geometría para conseguir un mejor funcionamiento con el que reducir las tensiones y las deformaciones. Niemeyer entiende que la vinculación entre estructura y programa debe ser total. La estructura no es algo que se adhiera al proyecto para sustentarlo, sino que es una herramienta más con la que proyectar. Así lo demuestra en el MAC de Niterói en el que estructura, forma y función se funden en un único concepto indivisible.

El análisis detallado de las tensiones y deformaciones obtenidas mediante un modelo informático nos demuestra la idoneidad de la estructura propuesta por Niemeyer.

Palabras clave: Museo, Niterói, Niemeyer, análisis estructural, modelo elementos finitos, hormigón postesado.

RESUM

El museu d'Art Contemporani de Niterói, projectat per Oscar Niemeyer en 1991, es una obra mestra de la arquitectura contemporània. Influenciat tant per les corrents puristes de Le Corbusier, com per les formes orgàniques de Wright, Niemeyer dissenya aquest museu circular en el que sintetitza les seves idees arquitectòniques.

El museu destaca especialment per la seva impressionant estructura. Un cilindre central suporta el pes de tota una estructura radial de formigó amb importants volades y grans llums. Aquesta estructura formada per bigues de gran cantell es fa servir de mecanismes de disseny estructural i de la pròpia geometria per a aconseguir un millor funcionament estructural capaç de reduir les tensions i les deformacions. Niemeyer entén que la vinculació entre estructura i programa deu ser total. L'estructura no s'adhereix al projecte amb la finalitat única de sustentar-lo, sinó que es una ferramenta més amb la que projectar. Així ho demostra en el MAC de Niterói en el que estructura, forma i funció es fonen en un únic concepte indivisible.

L'anàlisi detallada de les tensions i deformacions obtingudes mitjançant un model Informàtic ens demostra la idoneïtat de l'estructura proposta per Niemeyer.

Paraules clau: Museu, Niterói, Niemeyer, anàlisi estructural, model elements finits, formigó postesat.

ABSTRACT

The Museum of Contemporary Art in Niterói, designed by Oscar Niemeyer in 1991, is a masterpiece of contemporary architecture. Influenced both by the purist architectural movement of Le Corbusier and the organic shapes of Wright, Niemeyer designed this round museum, which summarizes his architectural ideas.

This museum is specially highlighted by its structural display. A central cylinder supports the weight of an entire concrete radial structure, with important cantilevers and large spans. This structure, consisting of deep beams, considers the structural design and geometry in order to achieve a better functioning to reduce strains and deformations. Niemeyer understands that structure and programme must be completely linked. Structure is not something adhered to the project in order to support it, but a tool used to project it. This feeling is shown in his MAC in Niterói, where structure, shape and function are merged into a single indivisible concept.

A detailed analysis of strains and deformations obtained from a computer model has proved the suitability of the structure proposed by Niemeyer.

Keywords: Museum, Niterói, Niemeyer, structural analysis, finite element method, concrete post-stressed.

OBJETO

En este trabajo se estudiará el Museo de Arte Contemporáneo de Niterói (Brasil). Proyectado en 1991 por Oscar Niemeyer, representa una obra maestra de la arquitectura contemporánea. Volumen, estructura, espacio y luz se funden en una obra singular en un entorno único.

En primer lugar se realizará una breve introducción que nos permita entender el contexto histórico, político y social tanto del lugar como del arquitecto. Se pretende así establecer las bases y entender las motivaciones que desembocaron en el museo que finalmente se construyó y que hoy analizamos.

En el siguiente apartado se describirá el museo desde el punto de vista funcional, espacial, de inserción en el lugar etc, proporcionando la documentación gráfica necesaria para entender el proyecto. También se profundizará en la materialidad y la ejecución de la obra.

Se pondrá especial atención al aspecto estructural, con una detallada descripción que compondrá el tercer capítulo del trabajo. En este apartado se explicará el funcionamiento de cada uno de los elementos estructurales, y su modelización informática.

En el bloque más importante del trabajo se analizarán los resultados obtenidos mediante el modelo estructural de elementos finitos realizado por ordenador. Se estudiará detalladamente cada uno de los elementos estructurales, lo cual nos permitirá conocer el comportamiento de esta obra de ingeniería estructural.

Por último se desarrollarán las conclusiones del estudio realizado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Contexto histórico. Brasil, Brasilia, Río de Janeiro y Niterói	7
1.2 Contexto histórico. El arquitecto: Oscar Niemeyer	9
2. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO: MAC DE NITEROI	13
2.1 Entorno e idea	14
2.2 Forma, volumen e implantación	16
2.3 Organización: Plantas y secciones	18
2.4 Materialidad y construcción	26
3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU MODELIZACIÓN	31
3.1 Descripción general de la estructura	32
3.2 Elementos estructurales y su modelización	35
3.3 Asignación de cargas	41
4. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL: ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1 Comportamiento general de la estructura	45
4.2 Análisis detallado por elementos	47
4.3 Efecto de cargas asimétricas	79
5. CONCLUSIONES	81
6. BIBLIOGRAFÍA	85
6.1 Bibliografía documental	86
6.2 Bibliografía fotográfica	89

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO. BRASIL, BRASÍLIA, RÍO DE JANEIRO Y NITERÓI

Con la vuelta de la democracia a Brasil en 1946, y después de que la segunda Guerra Mundial dejara al país en estado de profunda crisis, la economía y el sector industrial empezaron a crecer considerablemente. En 1960, se construyó la nueva capital, Brasilia, a manos de Lúcio Costa y Oscar Niemeyer (imagen 1.1). La creación de Brasilia se convirtió en el símbolo de un país que aspiraba a ser moderno y democrático, en lucha por superar las desigualdades sociales y la miseria en un tiempo en el que las convulsiones políticas dificultaban cualquier cambio.

En ésta época, los arquitectos brasileños estaban ya altamente influenciados por el movimiento moderno, la arquitectura de vanguardia que descendía de Le Corbusier. Prueba de ello es el urbanismo de la nueva ciudad de Brasilia: funcional, racional, simple y revolucionaria. Muchos arquitectos como Lúcio Costa o Niemeyer, se encargaron de expandir las ideas del movimiento moderno a lo largo de todo el territorio Brasileño.

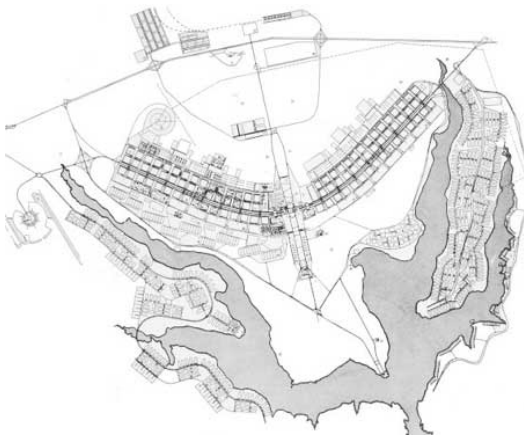


Imagen 1.1 Plano ciudad de Brasilia.

"Nace de un gesto primario, del que señala un sitio o toma posición sobre él. Dos ejes que se cruzan en ángulo recto, haciendo la señal de la cruz"

Lúcio Costa sobre la ciudad de Brasilia.

Antes de la creación de Brasilia como capital del país (1960), la ciudad que ostentaba este título era Río de Janeiro. Oscar Niemeyer, nacido en un país donde ni siquiera la capital tenía alumbrado público (1907), fue capaz de diseñar la moderna ciudad de Brasilia que se construiría 50 años después.

En 1964, un golpe de estado militar acabó derivando en una dictadura plena. Debido al extraordinario crecimiento económico, el régimen alcanzó un alto nivel de popularidad. Sin embargo, para muchas personas influyentes en la vida de Brasil, el régimen dictatorial supuso el exilio. Es el ejemplo de Oscar Niemeyer, que habiéndose declarado abiertamente comunista, tuvo que exiliarse a Europa.

En 1974, el general Ernesto Geisel asumió la presidencia y comenzó un lento y largo proceso de redemocratización del país. Los exiliados pudieron volver, y la transición hacia la democracia nos lleva, a día de hoy, a un país democrático, económicamente emergente.

Río de Janeiro ha sido tradicionalmente y sigue siendo en la actualidad una de las ciudades más importantes de Brasil. La que fue capital del país hasta 1960, se sitúa a las puertas de la Bahía de Guanabara. En la otra parte del estrecho que forma la entrada a la bahía, se encuentra la ciudad de Niterói. Ambas ciudades disponen de un paisaje envidiable (imágenes 1.2 y 1.3). Desde Niterói se puede observar, además de la bahía de Guanabara, la península del pan de azúcar, el parque natural del Corcovado, el Cristo Redentor etc.



Imagen 1.2 Vista desde Niterói: entrada de la bahía de Guanabara, el pan de Azúcar y el Corcovado



Imagen 1.3 Vista desde Río de Janeiro: Cristo Redentor, entrada de la bahía de Guanabara y el pan de Azúcar



Imagen 1.4 Copacabana. Río de Janeiro

Actualmente, Río de Janeiro y Niterói son dos ciudades con un estrecho vínculo, con altos atractivos turísticos, y económicamente emergentes.

Sin embargo, al igual que en el resto de urbes importantes de Brasil, son ciudades con grandes diferencias entre las clases sociales, tal y como podemos observar en las imágenes 1.4 y 1.5. Por una parte hay lugares muy avanzados tecnológicamente y económicamente: la zona del corredor del mar de Niterói, el barrio de Copacabana, edificios como el Museo de Arte Contemporáneo, el teatro popular, etc y hay grandes empresas multinacionales como Sony, Coca-Cola o Peugeot. Pero por otra parte estas ciudades conviven con barrios de muy bajo nivel económico, con las favelas, y con un alto índice de pobreza y delincuencia.



Imagen 1.5 Favelas en Río de Janeiro

1.2 CONTEXTO HISTÓRICO. EL ARQUITECTO: OSCAR NIEMEYER.

Oscar Niemeyer nació en diciembre de 1907, en un barrio burgués de Río de Janeiro, que en aquel momento era la capital de Brasil. Al terminar la enseñanza secundaria, a los 21 años, se casó con Annita Baldo, y empezó a trabajar en el taller de tipografía de su padre. El año siguiente, en 1929, ingresa en la Escuela Nacional de Bellas Artes de Río, que incluye la Escuela de Arquitectura.

Con Lúcio Costa como director de la escuela, las ideas del movimiento moderno que traía de Le Corbusier llegaron rápidamente a Niemeyer y al resto de alumnos. Se podría decir que el movimiento moderno llegó a Brasil de la mano de Gregory Warchavchick y Lúcio Costa. Existe también la influencia directa del propio Le Corbusier, tanto por sus visitas, como por sus propios libros y publicaciones, entre otros, L'Esprit Nouveau. Le Corbusier se dirigía a aquellos países que estaban evolucionando, apunto de cruzar el umbral de la industrialización, para decirles que la arquitectura debería ser la base de la "maquinización" de un país. En definitiva, para expresar las ideas del movimiento moderno.

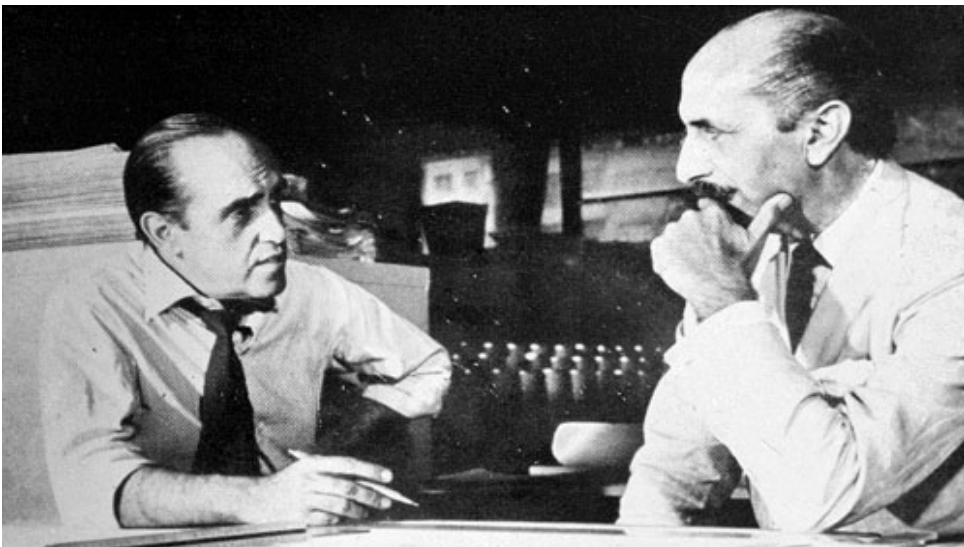


Imagen 1.6 Oscar Niemeyer y Lúcio Costa proyectando la ciudad de Brasilia

Niemeyer reconoció el valor de aquellas ideas que Lúcio Costa promulgaba, y pidió ingresar en su estudio para realizar prácticas. Costa, apenas 5 años mayor, sería su maestro, su mentor y su amigo de por vida. En la imagen 1.6 vemos a los dos grandes de la arquitectura proyectando juntos.

Lúcio Costa incluyó a Niemeyer en el grupo encargado del proyecto del Ministerio de Educación y Salud de Río de Janeiro (1936) que vemos en la imagen 1.7. Le Corbusier también participó en este proyecto, y Niemeyer tuvo la ocasión de conocerlo y trabajar con él (imagen 1.8).

"Conocíamos a Le Corbusier por su notable obra como arquitecto. Era como nuestro catecismo. ¡Pero qué diferencia verlo trabajar y oírle hablar de arquitectura!"

Oscar Niemeyer

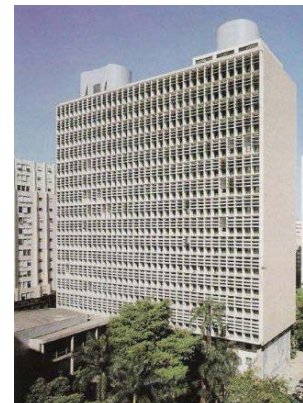


Imagen 1.7 Ministerio de Educación y Salud de Río de Janeiro. 1936

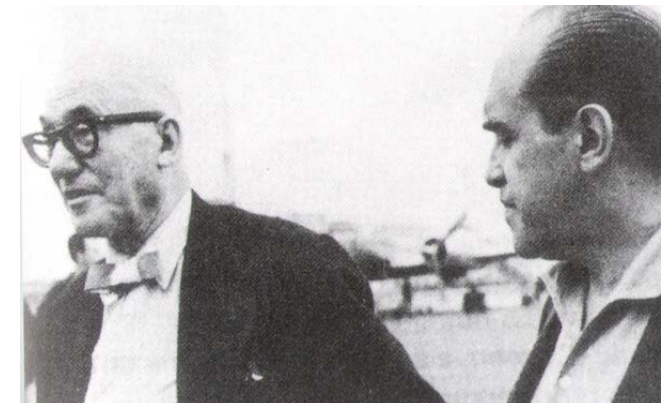


Imagen 1.8 Le Corbusier y Oscar Niemeyer en Río de Janeiro

Sin embargo, a pesar de la notable influencia de Le Corbusier, Niemeyer se sentía más atraído por la arquitectura de Giuseppe Terragni, que por las casas puristas de Le Corbusier.

"No es el ángulo recto lo que me atrae, ni la línea recta, dura, inflexible, creada por el hombre. Lo que me atrae es la curva libre y sensual, la curva que encuentro en las montañas de mi país, en el curso sinuoso de sus ríos, en las olas del mar, en el cuerpo de la mujer preferida."

Oscar Niemeyer

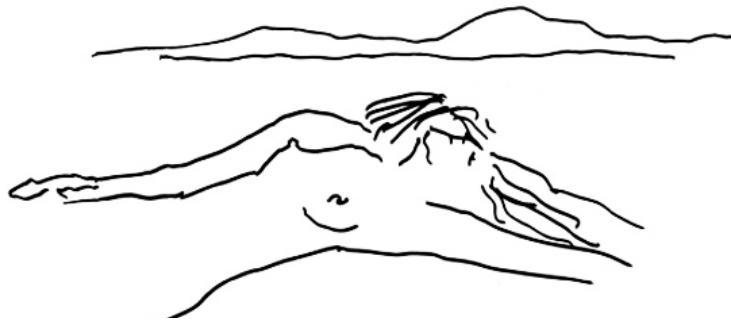


Imagen 1.9 Dibujo de Niemeyer en el que muestra su pasión por la línea curva y su inspiración en el paisaje y en el cuerpo de la mujer

A partir de 1939, Niemeyer empieza a trabajar por cuenta propia. Desde ese momento, el brasileño comienza a acercarse más hacia las preocupaciones estéticas, alejándose de la reinante austeridad y la rigurosa racionalización del movimiento moderno, pero sin olvidar en ningún momento la importancia de la función. Estas ideas se materializan por primera vez en Pampulha, (1940) tal y como se observa en la imagen 1.10. Desde ese momento, Niemeyer nunca abandonará la línea curva.



Imagen 1.10 Iglesia San Francisco de Asís, Conjunto Pampulha. 1943. Belo Horizonte, Brasil

Otra influencia que el arquitecto brasileño recibe del movimiento moderno es el uso del hormigón armado. Sin embargo, Niemeyer lo usa de manera distinta, aprovecha la plasticidad de este material para crear formas curvas, sugerentes e imposibles. El propio Le Corbusier le dice: *“Oscar, tú tienes siempre en los ojos las montañas de Río. Con el hormigón construyes el Barroco.”*

Otro contrapunto con las ideas del movimiento moderno es su postura frente a la industrialización de la arquitectura, y la producción en serie de los elementos que la conforman. Cuando en 1952 Niemeyer construyó la Casa das Canoas (imagen 1.11), influenciado tanto por Le Corbusier y por Mies como por las formas orgánicas de Frank Lloyd Wright y de Alvar Aalto, Gropius le comentó que era muy bella, pero que no podía producirse en serie. *“¡Como si a mí me interesara semejante cosa!”* contestó Niemeyer.



Imagen 1.11 Casa das Canoas, vivienda de Oscar Niemeyer. Río de Janeiro, 1952.



Imagen 1.12 Dibujo de Niemeyer de la Casa das Canoas

¿Cómo puede ser repetible una casa que tiene un entorno concreto, unas curvas de nivel donde asentarse, una luz, un paisaje...? ¿Cómo puede ser repetible?”

Oscar Niemeyer sobre la industrialización de la arquitectura

En 1960, junto a su maestro y gran amigo Lúcio Costa, diseñan la nueva capital del país: Brasilia. Además de proyectar la ciudad desde cero, Niemeyer construye también varios edificios representativos en la ciudad, como son el Congreso Nacional, el Palacio de Itamaraty, el Ministerio de Justicia, el palacio da Alvorada, la catedral etc, que vemos en la imagen 1.13.

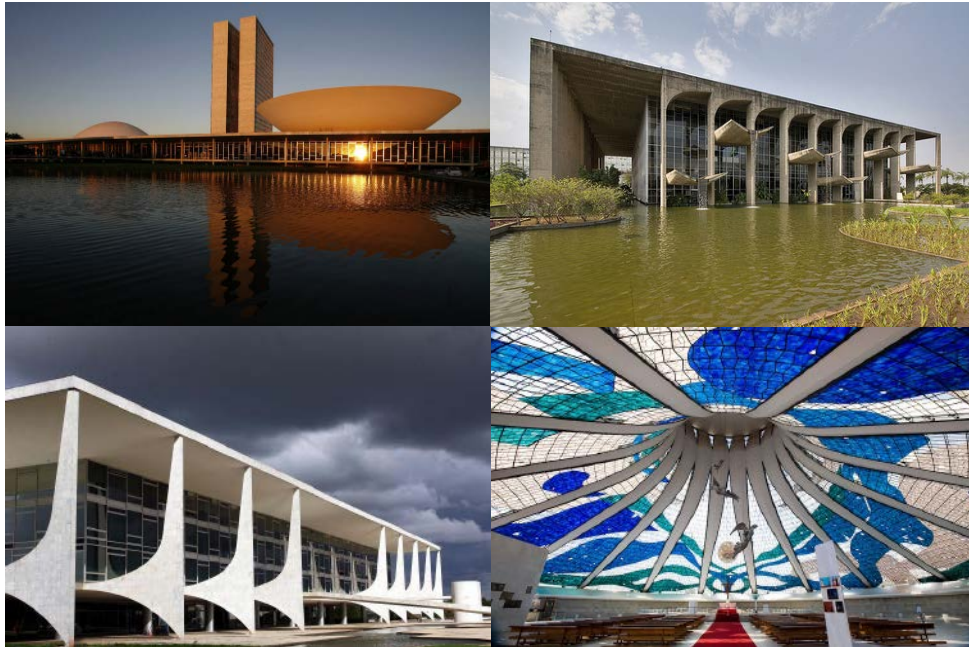


Imagen 1.13. Obras de Niemeyer para la nueva ciudad de Brasilia. De izquierda a derecha y de arriba a bajo: 1. Congreso Nacional; 2. Ministerio de justicia; 3. Palacio da Alvorada; 4. Catedral de Brasilia.

Niemeyer era abiertamente comunista, por lo que con la caída del gobierno constitucional en 1964, y la represión y persecución a los comunistas, tuvo que exiliarse en París. El brasileño permaneció en Europa desde 1966 hasta 1976. Durante estos años construyó sobre todo en París, para el partido comunista francés, pero también en Italia (Sede de Mondadori en Milán y Fata Engineering en Turín), en Argelia (Plan de urbanización de Argel) y en el Líbano (Feria internacional de Trípoli). Estos años de exilio le permiten visitar nuevas ciudades, aprender cosas nuevas, y expandirse internacionalmente como arquitecto.

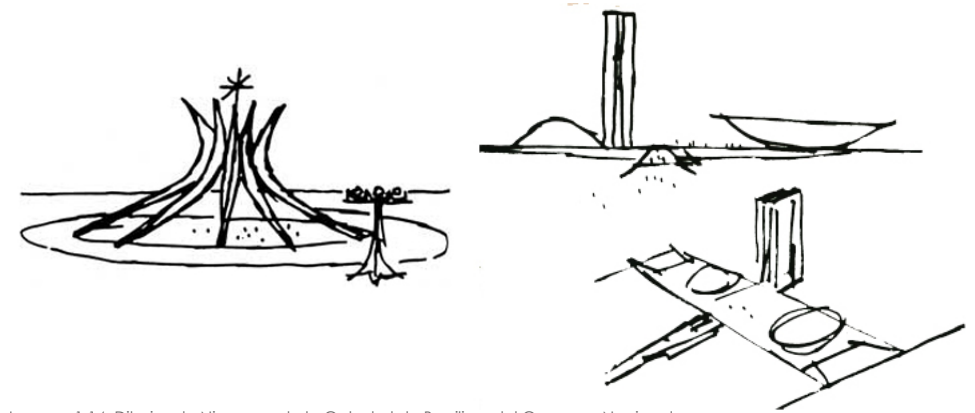


Imagen 1.14. Dibujos de Niemeyer de la Catedral de Brasilia y del Congreso Nacional.

En 1976, con 69 años, vuelve a Brasil, que se encuentra en un proceso de transición hacia la democracia. Niemeyer sigue proyectando y construyendo un gran número de edificios extraordinarios, como son el Sambódromo de Río, en 1983, o el Memorial de América Latina, en 1987 (imagen 1.15).



Imagen 1.15 Memorial de América Latina, São Paulo, 1987

La merecida concesión del premio Pritzker en 1988, se traducirá en un mayor número de encargos para un arquitecto que ya pasa de los 80 años.

En esta última etapa, Niemeyer construye el Museo de Arte Contemporáneo (MAC) de Niterói. Como vemos en la imagen 1.16, todavía en este proyecto de 1991 se distinguen las características iniciales del arquitecto mencionadas al principio: formas curvas, uso del hormigón para conseguir estas formas, y funcionalidad. Este encargo, realizado para aumentar el número de visitantes en la ciudad de Niterói, cumplirá con creces su función.



Imagen 1.16 Museo de Arte Contemporáneo de Niterói, 1991

El objetivo de atraer viajeros a Niteroi se consiguió con un enorme éxito, convirtiéndose el MAC en un foco de atención importantísimo, tanto por la propia colección que alberga en su interior, como por el interés arquitectónico del propio edificio y su uso como mirador. Debido a este enorme éxito, desde la administración se quiso fomentar el impacto positivo sobre la ciudad, proponiendo una serie de instituciones culturales y religiosas que se han ido incorporando a este frente marítimo, conformando el "Caminho Niemeyer". Algunos de los proyectos que Niemeyer construirá aquí son el Teatro Popular, la Estación Náutica, la plaza Juscelino Kubitschek, el Memorial Roberto Silveira, la fundación Oscar Niemeyer, un centro de congresos, una torre mirador, etc, algunos de los cuales se muestran en la imagen 1.17.



Imagen 1.17 Elementos del "Caminho Niemeyer", en Niterói. 1. Arriba: Teatro Popular 2. Izquierda: Memorial Roberto Silveira 3. Derecha: Sede de la fundación Oscar Niemeyer

En 2008, con 101 años, realiza sus últimos proyectos: el parque Urquiza en Argentina, y la plaza de la soberanía en Brasilia. Muere en 2012, a punto de cumplir los 105 años, y después de una completa vida como arquitecto. Niemeyer estuvo proyectando y viviendo la arquitectura hasta el final de sus días, pero siempre sin olvidar que:

"La vida siempre me pareció más importante que la arquitectura."

Oscar Niemeyer

2. PROYECTO ARQUITECTÓNICO

2.1 ENTORNO E IDEA

La ciudad de Niterói, que había sido la capital del estado de Río de Janeiro hasta 1975, se encontraba en 1990 relegada de la importancia que tuvo anteriormente: Río de Janeiro se había convertido en la ciudad importante, y Niterói se encontraba en decadencia. La voluntad del alcalde de Niterói de atraer visitantes a la ciudad para revitalizarla e impulsar su economía, sumado al generoso donativo de una colección de obras de arte cedidas por el coleccionista Joao Sattamin, desembocó en la creación del "Museo de Arte Contemporáneo de Niterói".

La arquitectura sorprendente y llamativa que caracteriza a Niemeyer, junto con su experiencia, su reconocimiento mundial, y el hecho de ser un arquitecto brasileño, lo convirtieron en el candidato idóneo para tal encargo.



Imagen 2.1 Entorno. Ciudad de Río de Janeiro y ciudad de Niterói

El entorno con el que se encontró Niemeyer para diseñar el museo era idílico. Tal y como vemos en la imagen 2.1, tanto la ciudad de Niterói como su vecina, Río de Janeiro, están situadas a las puertas de la bahía de Guanabara. Con una costa pedregosa en algunos lugares, y de playas de arena fina en otros, el borde de la ciudad con el mar va formando pequeñas bahías y lugares de gran atractivo. En la otra parte del estrecho, en la ciudad de Río de Janeiro, se encuentra el Cerro del Corcovado, un gran parque natural en la cima del cual se alza el famoso Cristo Redentor. También en esta parte de la bahía emerge del agua el "Pan de Azúcar", un gigantesco

domo de casi 400 metros de altitud situado en la boca de la bahía. Todos estos hitos, además de la bahía de Guanabara, se pueden observar y admirar desde la ciudad de Niterói.



Imagen 2.2 Entorno. Ciudad de Río de Janeiro, ciudad de Niterói, el Corcovado y el Pan de Azúcar

El emplazamiento del museo en la ciudad de Niterói (imagen 2.2) no podía ser mejor: en la costa de la ciudad. Con vistas a los hitos y paisajes naturales comentados anteriormente y que se ven en la imagen 2.4, el museo goza de una posición privilegiada, que Niemeyer aprovechará al máximo.

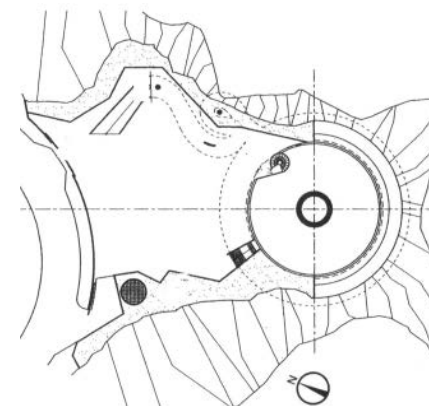


Imagen 2.3 Plano de emplazamiento

"El terreno era estrecho, rodeado por el mar y la solución ocurrió naturalmente, teniendo como punto de partida el inevitable apoyo central. De él, la arquitectura ocurrió espontánea como una flor. La vista hacia el mar era bellísima y había que aprovecharla."

Oscar Niemeyer



Imagen 2.4 Vistas desde Niterói. Izquierda: Pan de Azúcar. Derecha: Corcovado y Cristo Redentor

“La arquitectura ocurrió espontánea como una flor [...] suspendí el edificio y bajo él el panorama se extendió todavía más rico. Definí entonces el perfil del museo. Una línea que nace desde el suelo y sin interrupción crece y se despliega, sensual, hasta la cobertura. La forma del edificio, que siempre imaginé circular, me fijé, y en su interior me detuve apasionado.”

Oscar Niemeyer

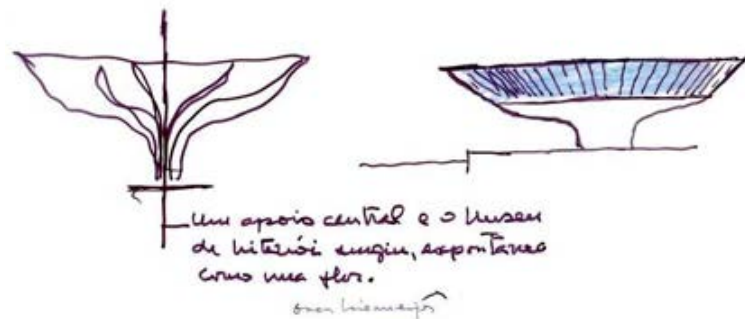


Imagen 2.5 Esquema realizado por Niemeyer

Tal y como explica Niemeyer, la idea del museo es la de una flor que emerge sobre el terreno de manera orgánica y ligera: un apoyo central que se va abriendo hacia el cielo (imagen 2.5). La voluntad desde el principio es establecer una estrecha relación con el paisaje, tanto de integración con éste, como de aprovechamiento de las vistas. Para ello, Niemeyer utiliza su característico diseño sinuoso: la curva, armonizando así con los perfiles de

las montañas de alrededor. Para conseguir las vistas desde el interior del museo, genera una rasgadura que recorre perimetralmente todo el volumen. Mediante la existencia de un único apoyo central, sumado a la forma curva y a la rasgadura perimetral que recorre el edificio, se consigue dar esa sensación de ligereza que transmiten las flores. Estructuralmente, el edificio sigue también con esta idea de flor, o de copa, en la que se transmiten todas las cargas a un apoyo central.



Imagen 2.6 Dibujos de Oscar Niemeyer. Relación del museo con las montañas del entorno y con las curvas del cuerpo de una mujer

El museo de Niterói se reafirma como un museo de la contemporaneidad, colocándose provocativamente contra el puro racionalismo. Su arquitectura se define, más que en el espacio expositivo interior, en la abertura hacia el exterior, tanto poética como funcional. El criterio proyectual dominante en el MAC es su integración en el contexto, en el paisaje, así como las vistas que se pueden atisbar desde el interior. Niemeyer rompe con los pretextos modernistas de “museo”, concebido como sucesiones de estructura y espacios silenciosos y anónimos, dejando paso a un museo mucho más orgánico, donde prima la relación entre espacios, la vinculación con el entorno, y entendiendo que el edificio encargado de albergar arte, debe ser también una obra de arte.

2.2 FORMA, VOLUMEN E IMPLANTACIÓN

El Museo de Arte Contemporáneo de Niterói tiene una clara influencia compositiva del proyecto no construido del Museo de Arte Moderno de Caracas, diseñado también por Niemeyer. Como vemos en la imagen 2.7, en este proyecto de 1954, el brasileño diseña una pirámide invertida apoyada por su vértice sobre un acantilado. En el MAC de Niterói, consigue materializar y construir esta idea pero con algunas diferencias. Las líneas rectas de la pirámide de Caracas evolucionan y se convierten en curvas que definen al volumen más como una flor o una copa que como una pirámide invertida. Con estas curvas, Niemeyer consigue además integrarse con el paisaje.

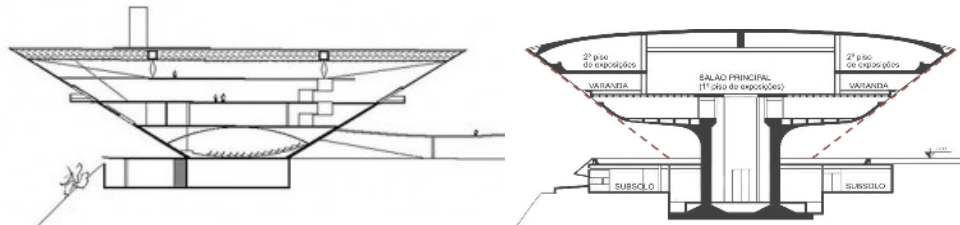


Imagen 2.7 Izquierda: sección del MAM de Caracas. Derecha: sección del MAC de Niterói



Imagen 2.8 Vista exterior del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói

La esbeltez del apoyo central en relación al vuelo de la cubierta consigue materializar la idea de que el edificio se alza como una flor, otorgándole ligereza al conjunto, y haciendo eco de un alarde estructural que llama la atención del visitante (imagen 2.8).



Imagen 2.9 Vista a través de la rasgadura perimetral

Como se ha comentado anteriormente, la intención de Niemeyer es aprovechar al máximo las espléndidas vistas de alrededor. Para ello, dispone una rasgadura perimetral que recorre toda la envolvente del edificio, permitiendo las visuales en 360° que vemos en la imagen 2.9.

El gran volumen de hormigón consigue dar un aspecto de ligereza gracias a la forma del edificio y a la rasgadura perimetral. Además, la colocación de una lámina de agua debajo del museo genera una sensación de ingravidez, como si el edificio flotara sobre el agua, a la vez que lo vincula con el agua de la bahía (imagen 2.10).



Imagen 2.10 Lámina de agua bajo el museo. Izquierda: Vista próxima. Derecha: Vista aérea

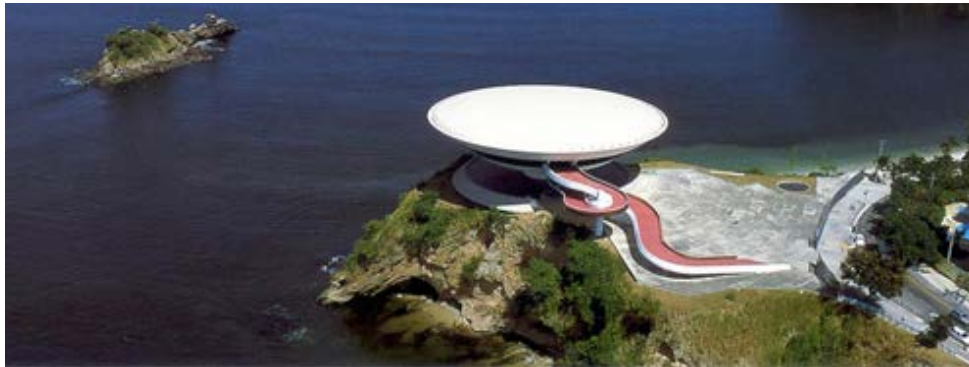


Imagen 2.11 Vista aérea del conjunto: Museo, rampa de acceso, plaza pública y entorno de la bahía y el acantilado

Niemeyer tiene en cuenta, además del edificio y sus vistas, el entorno más inmediato. El arquitecto brasileño diseña una plaza pública a través de la cual se puede acceder al museo (imágenes 2.11 y 2.12). Gracias a la elevación del museo sobre un único apoyo central, esta plaza es espacialmente mucho más abierta, y con un gran ámbito visual que no se ve truncado por la construcción. De este modo, otorga a los ciudadanos un espacio público de muy buenas características y espectaculares vistas, que se integrará perfectamente con el posterior "Caminho Niemeyer".

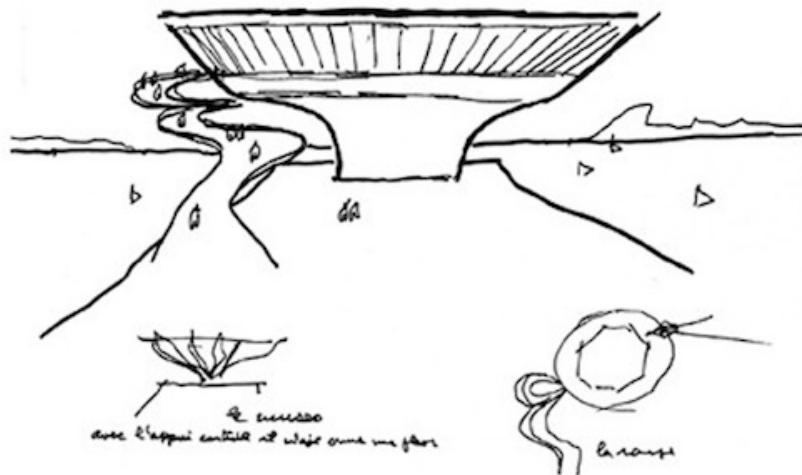


Imagen 2.12 Dibujo de Niemeyer. Vista de acceso al museo

Desde esta plaza pública, el visitante del museo empieza un recorrido por una sinuosa rampa que le lleva hasta el acceso elevado del museo, permitiéndole disfrutar de unas agradables vistas durante el ascenso. Observamos, una vez más, la influencia de Le Corbusier en este "paseo arquitectónico" que genera Niemeyer. En la imagen 2.13 vemos cómo utiliza el color rojo para destacar esta particular rampa de acceso.

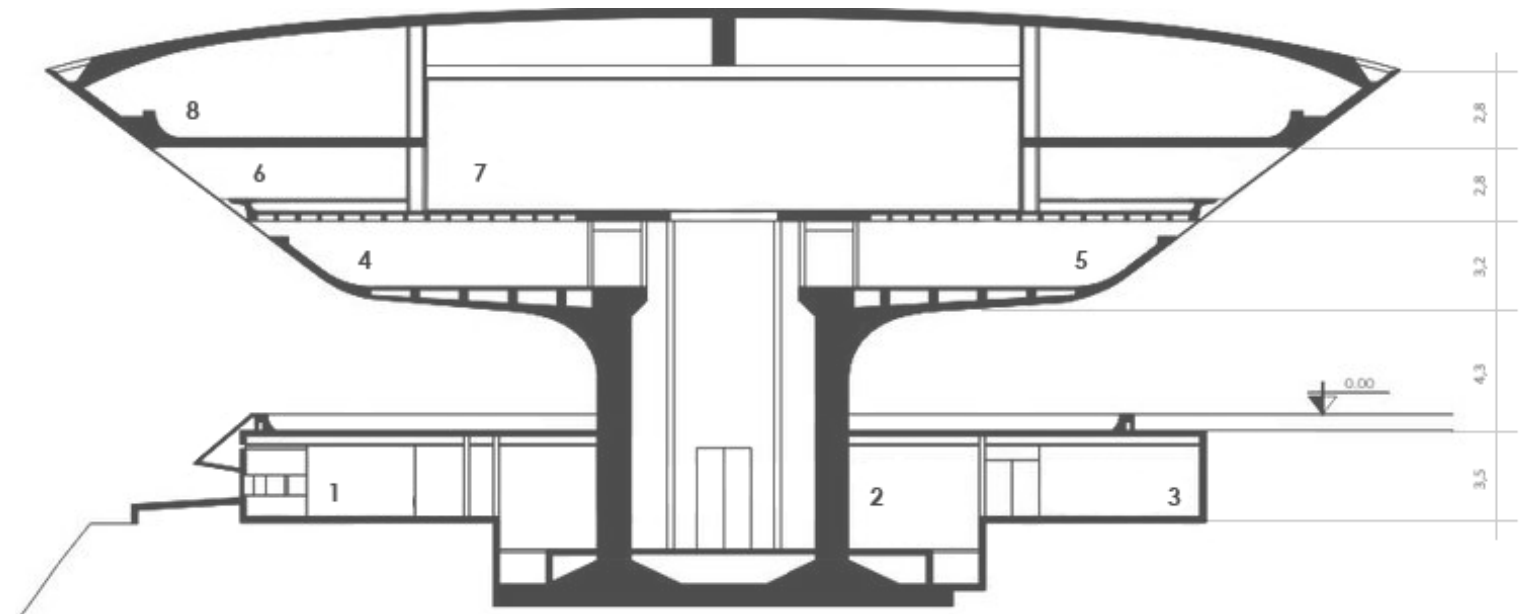


Imagen 2.13 Rampa de acceso al museo

2.3 ORGANIZACIÓN

SECCIÓN

- 1_ Restaurante
- 2_ Archivo
- 3_ Auditorio
- 4_ Dependencias administrativas
- 5_ Acceso desde la rampa
- 6_ Salas de exposiciones
- 7_ Sala principal de exposiciones
- 8_ Galería de exposiciones



SECCIÓN A - A'

Escala 1:300

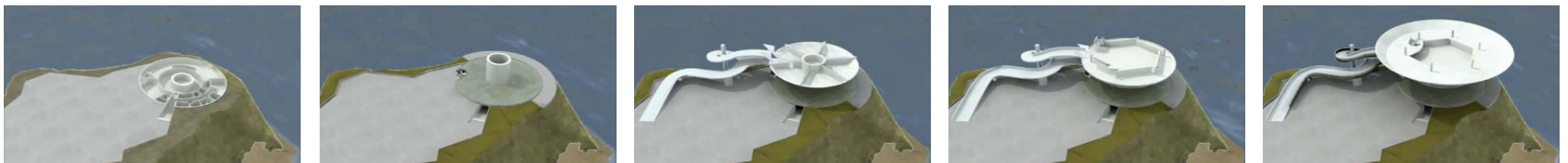


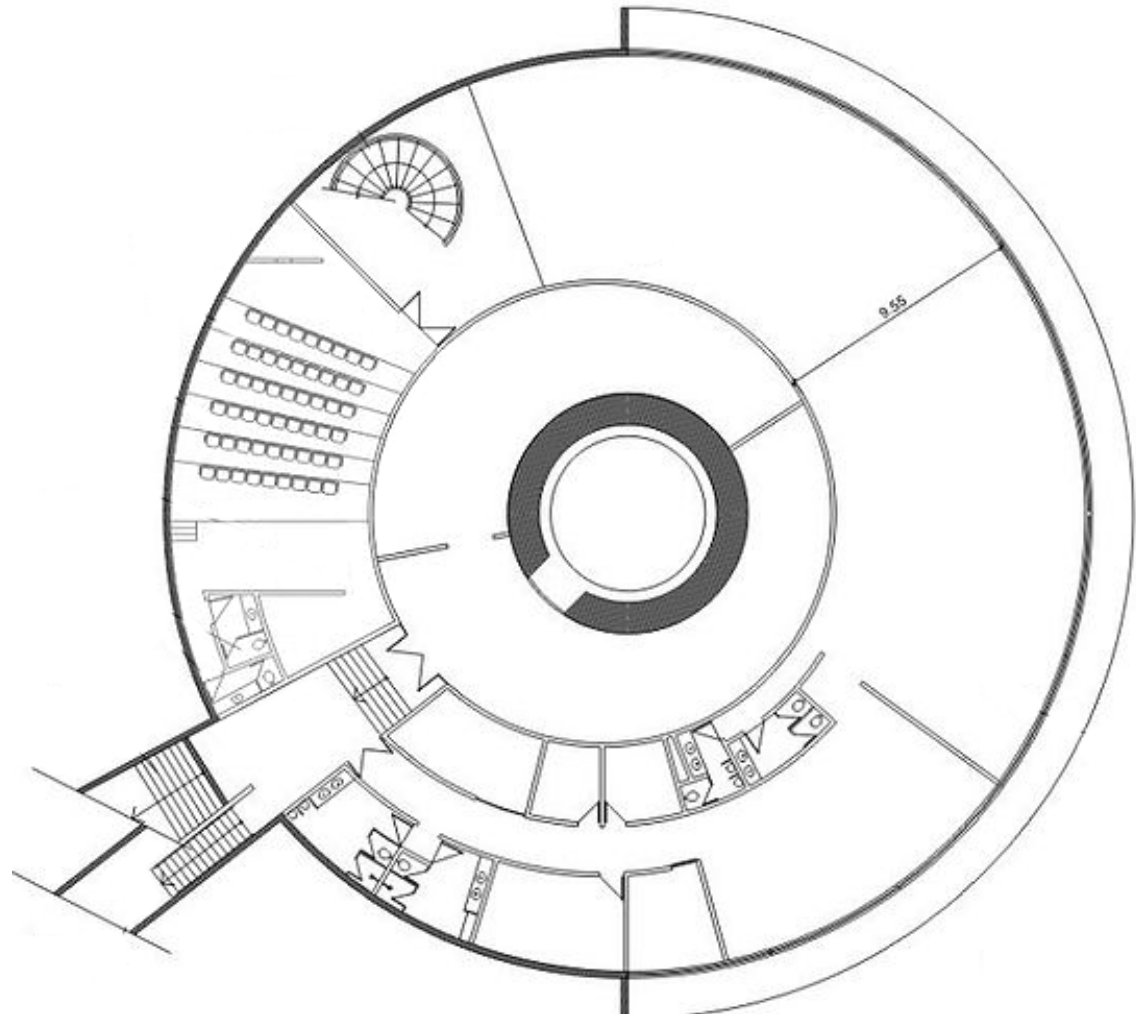
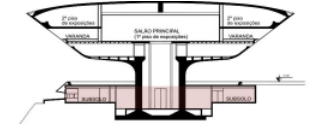
Imagen 2.14 Secuencia de imágenes de la organización por plantas del museo

PLANTA SUBTERRÁNEA

Debajo del gran volumen en forma de flor, se construye una planta semienterrada sobre la que descansa la lámina de agua de la plaza.

Esta planta se organiza en dos partes. Por una parte, una geometría circular que responde a la proyección del museo, y que se organiza alrededor del núcleo central estructural (*Plano "Planta subterránea -1"*). En esta zona se sitúan espacios de almacenamiento y archivos, así como algunos espacios públicos como son el auditorio, el bar – restaurante, y sus espacios servidores: cocina y baños. Estos espacios se abren a la bahía, a través de una delgada ventana que se abre horizontalmente, tal y como se observa en la sección anterior.

Desde aquí, una escalera nos lleva a través de un corredor subterráneo hasta una zona rectangular enterrada (imagen 2.15) donde se disponen las instalaciones: central de energía con 800 KVA, dos depósitos de abastecimiento de 6000m³ cada uno, máquinas de aire acondicionado, bombas hidráulicas, etc.



PLANTA SUBTERRÁNEA (-1)

Escala 1:300

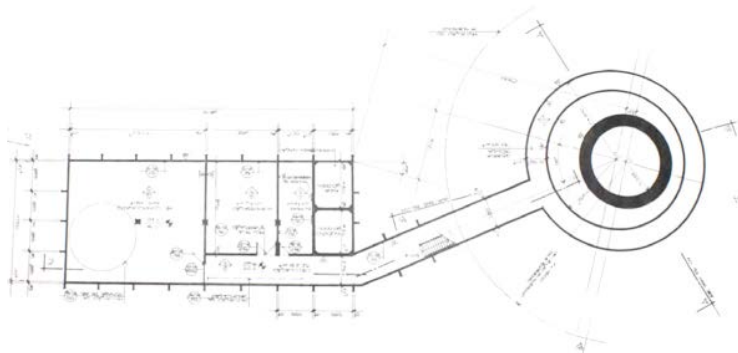


Imagen 2.15 Croquis planta sótano

- 1_ Acceso desde la plaza
- 2_ Almacenamiento y archivo
- 3_ Auditorio
- 4_ Bar - restaurante
- 5_ Baños
- 6_ Cocina
- 7_ Almacenamiento cocina
- 8_ Acceso a la zona de instalaciones

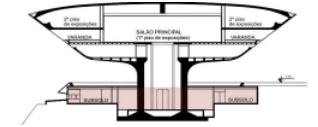
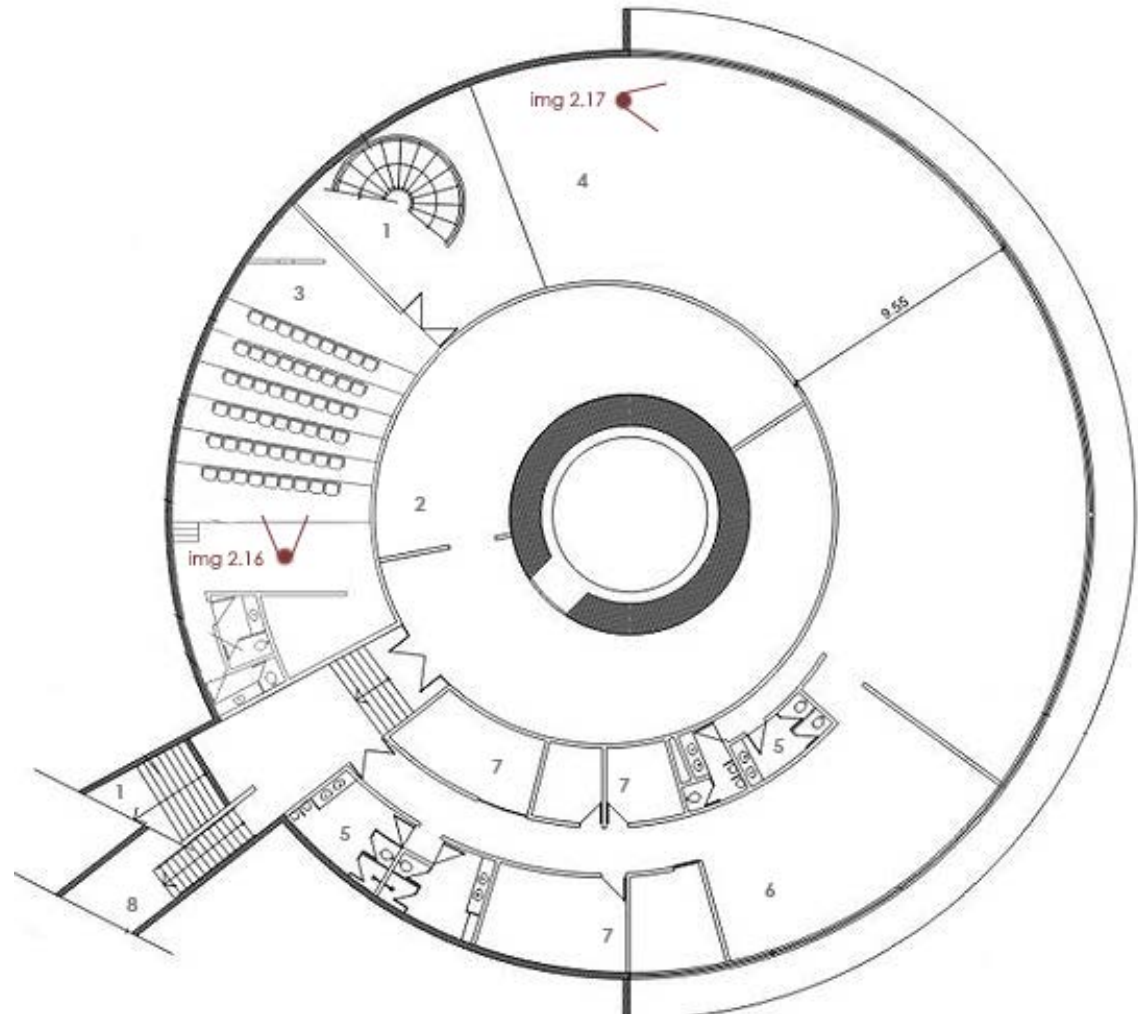


Imagen 2.16 Auditorio



Imagen 2.17 Restaurante



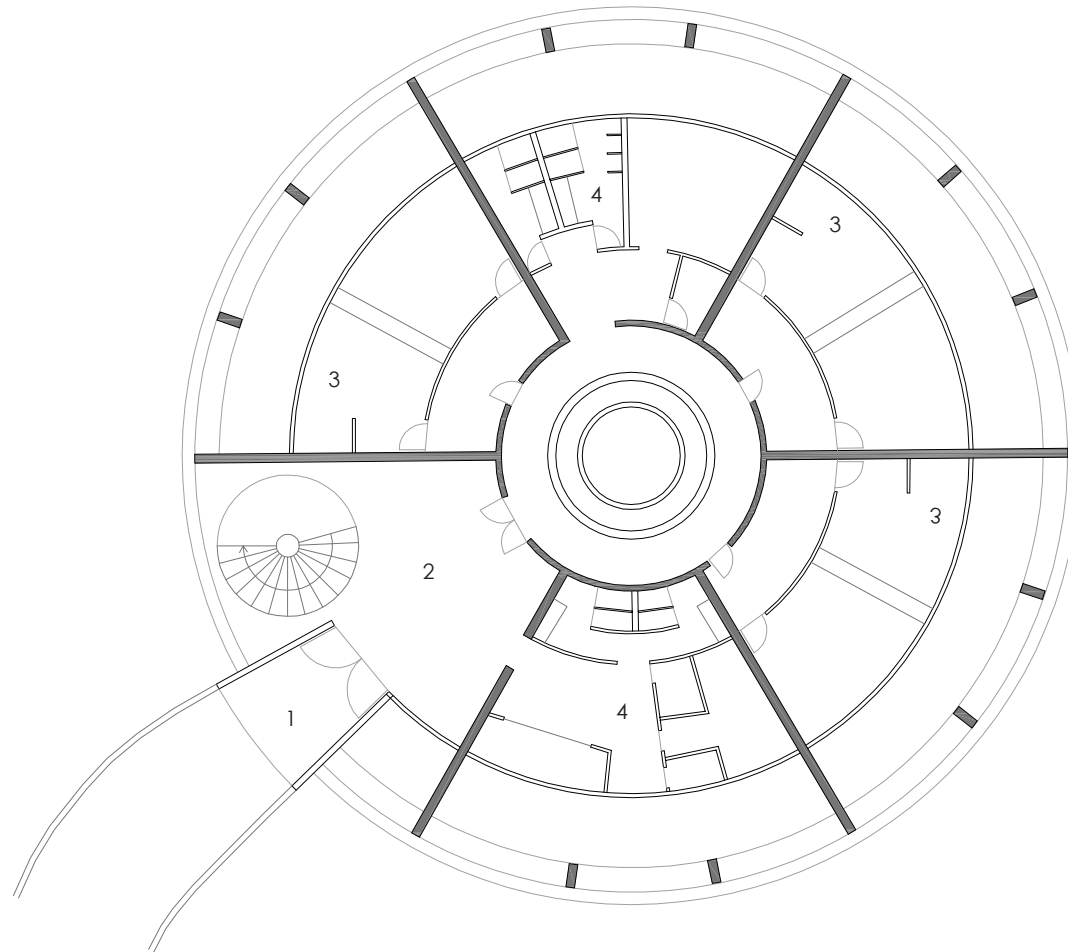
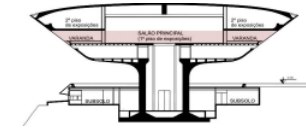
PLANTA SUBTERRÁNEA (-1)

Escala 1:300

PLANTA PRIMERA

Esta planta se divide radialmente en 6 salas de las mismas dimensiones según la distribución que vemos en el plano "Planta primera". Uno de estos sectores se reserva para el acceso desde la rampa exterior y la recepción, así como para la comunicación vertical con la planta superior. Las otras 5 salas se destinan a despachos de administración y baños, y se comunican mediante un corredor circular que discurre perimetralmente al núcleo central. Los muros que compartimentan la planta son en realidad vigas de gran canto que forman parte de la singular estructura, y que se explicarán detalladamente en el apartado 3 "Descripción de la estructura".

- 1_ Rampa de acceso desde la plaza
- 2_ Vestíbulo de recepción
- 3_ Despacho de administración / salas de trabajo
- 4_ Servicios



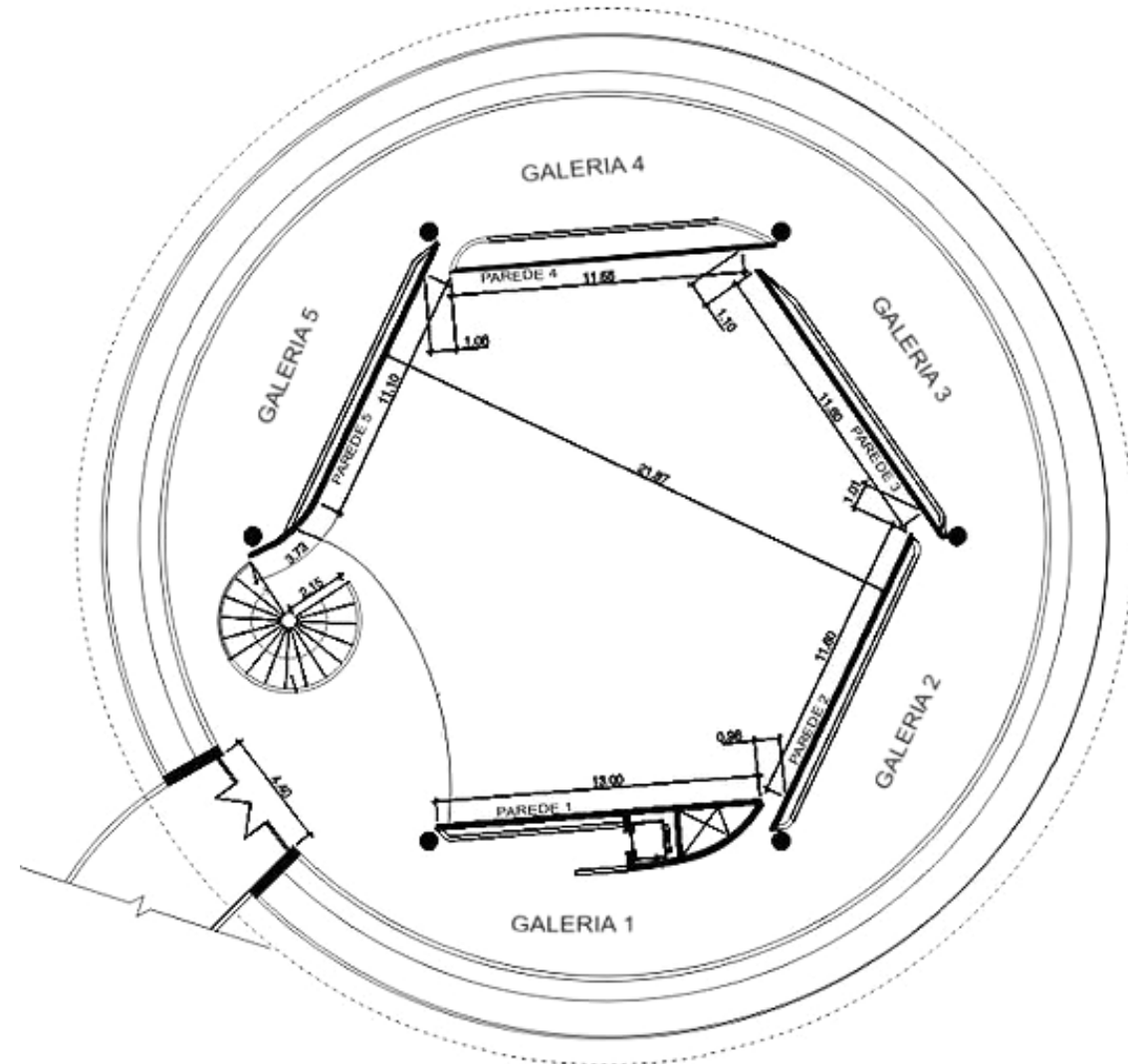
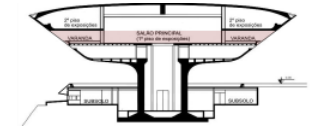
PLANTA PRIMERA

Escala 1:300

PLANTA SEGUNDA

En esta planta se sitúa el espacio más importante del museo: la sala principal de exposiciones (imágenes 2.18 y 2.19). Se coloca en la zona central y tiene una altura igual a la de dos plantas del museo. La sala principal tiene forma hexagonal, creada mediante tabiques ligeros que no llegan a tocarse entre sí, y que sirven de apoyo a las obras que se exponen. Uno de los lados del hexágono está completamente abierto, y es el punto al que llega la rampa de acceso desde la plaza exterior. Esta sala se ilumina con iluminación artificial y con iluminación indirecta natural que llega hasta el espacio interior a través de los huecos entre las paredes del hexágono.

Alrededor del espacio central, se crean 5 galerías dedicadas a exposiciones. Estos espacios, de 2'5 metros de altura libre, vuelcan directamente a la bahía a través de la gran rasgadura perimetral que recorre el edificio. Estas galerías son unos de los lugares más característicos y representativos del museo, ya que generan unas vistas espléndidas de la bahía de Guanabara que otorgan al edificio la función de mirador además de museo (imagen 2.20).



PLANTA SEGUNDA

Escala 1:300

- 1_ Acceso desde la rampa
- 2_ Sala de exposiciones principal
- 3_ Galerías de exposiciones
- 4_ Acceso a la planta superior



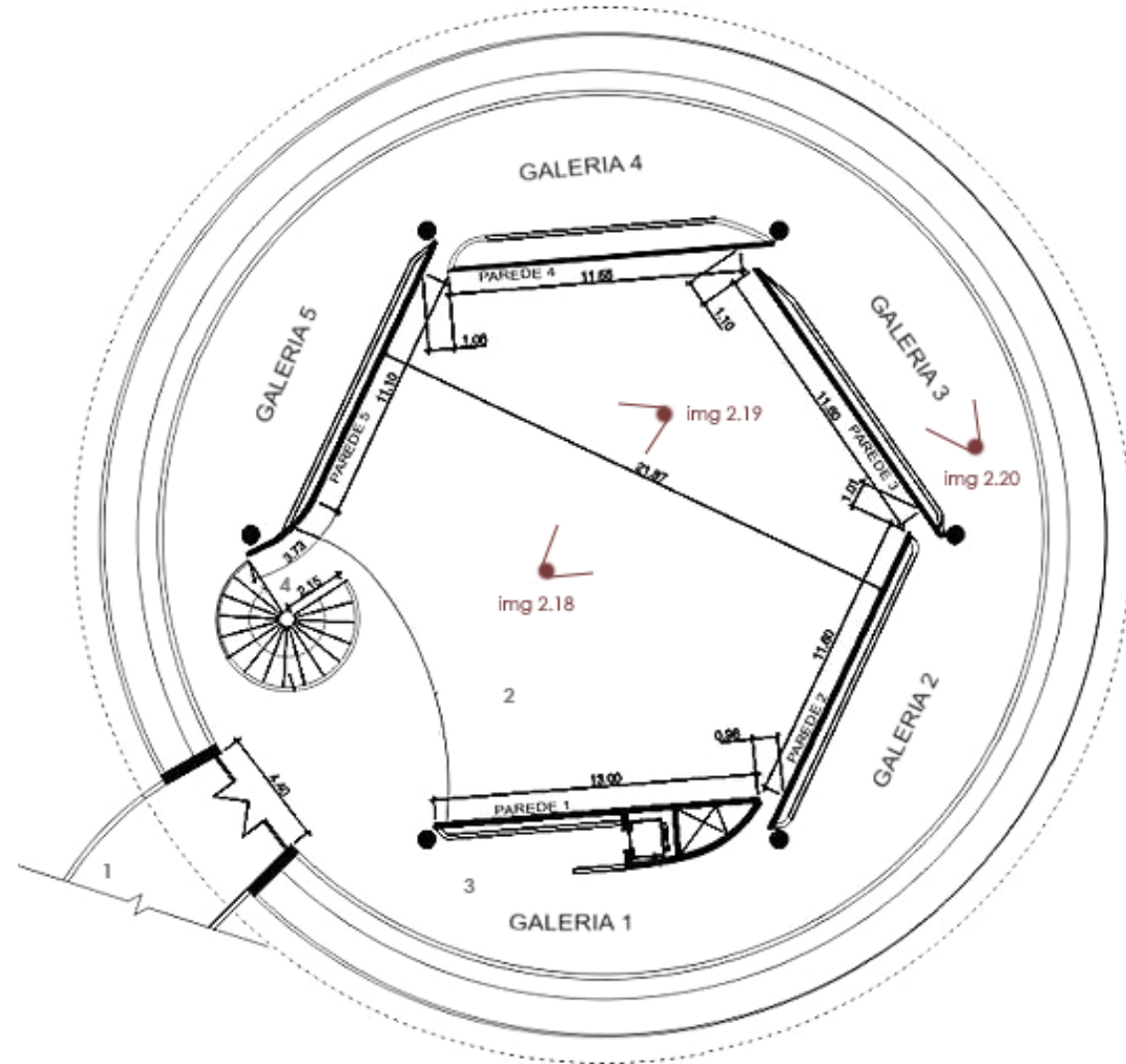
Imagen 2.18 Sala de exposiciones principal



Imagen 2.19 Sala de exposiciones principal



Imagen 2.20 Galería perimetral de exposiciones



PLANTA SEGUNDA

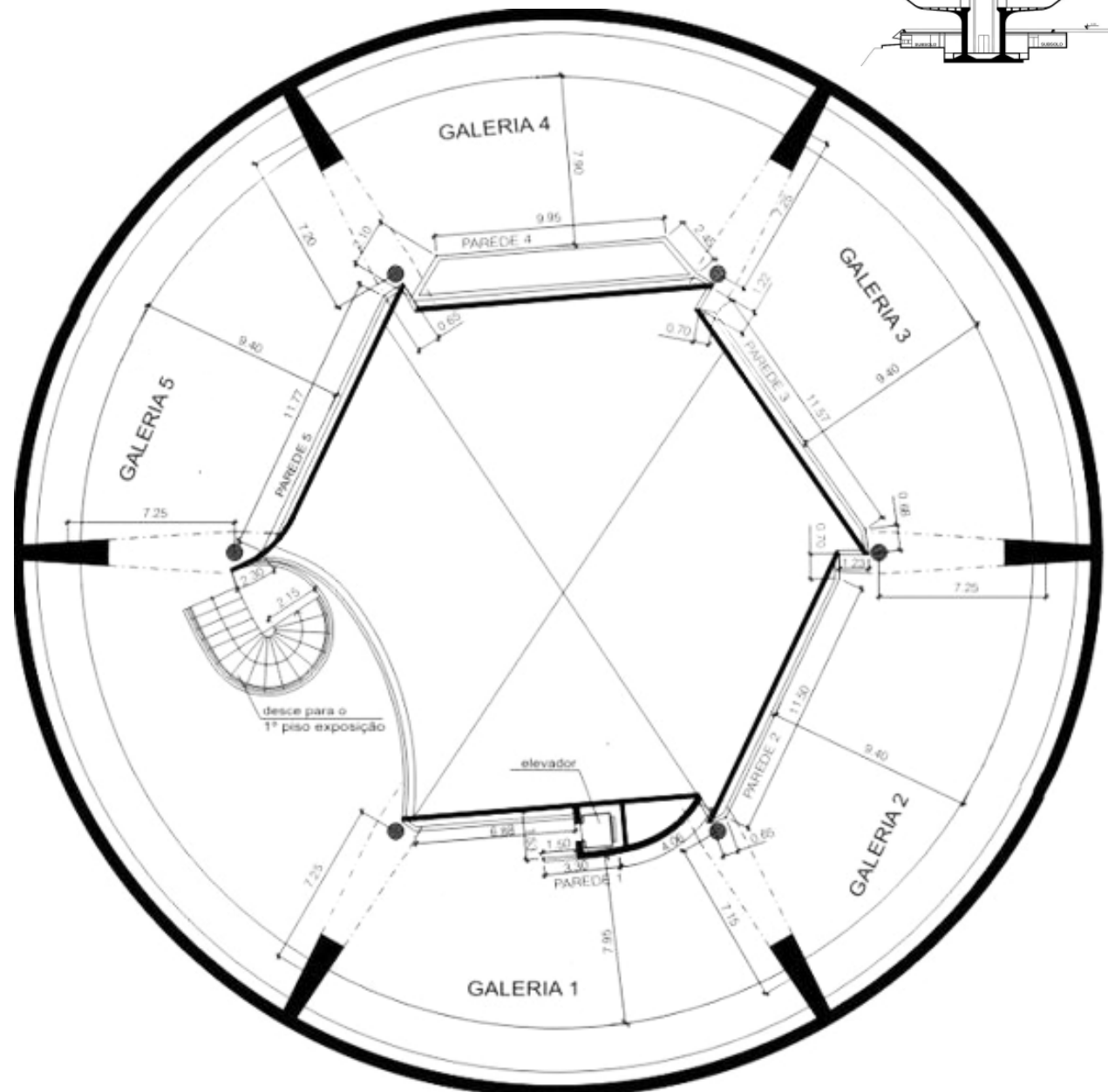
Escala 1:300

PLANTA TERCERA

La última planta del museo se divide en 6 espacios independientes pero comunicados, colocados alrededor de un gran vacío central que otorga una mayor altura a la sala principal de la planta inferior. El primero de estos espacios sirve de acceso desde la planta segunda, (imagen 2.21) abriéndose a la sala principal a modo de balcón, y permitiendo contemplar la totalidad del gran espacio central de exposiciones. Las otras 5 zonas que se delimitan están dedicadas a galerías de exposición, y no tienen relación directa con la planta inferior.

La estructura es el elemento encargado de diferenciar cada uno de los espacios que conforman las galerías de exposiciones. Las grandes vigas de 70 centímetros de ancho y más de un metro de canto, junto con los pilares circulares, delimitan el cambio de una galería a otra, tal y como se observa en la imagen 2.22.

En estas galerías diáfanos, el mobiliario se adapta a los requerimientos de cada exposición. La iluminación, completamente artificial en esta planta, también se acomoda a las necesidades de percepción de las obras expuestas.



PLANTA TERCERA

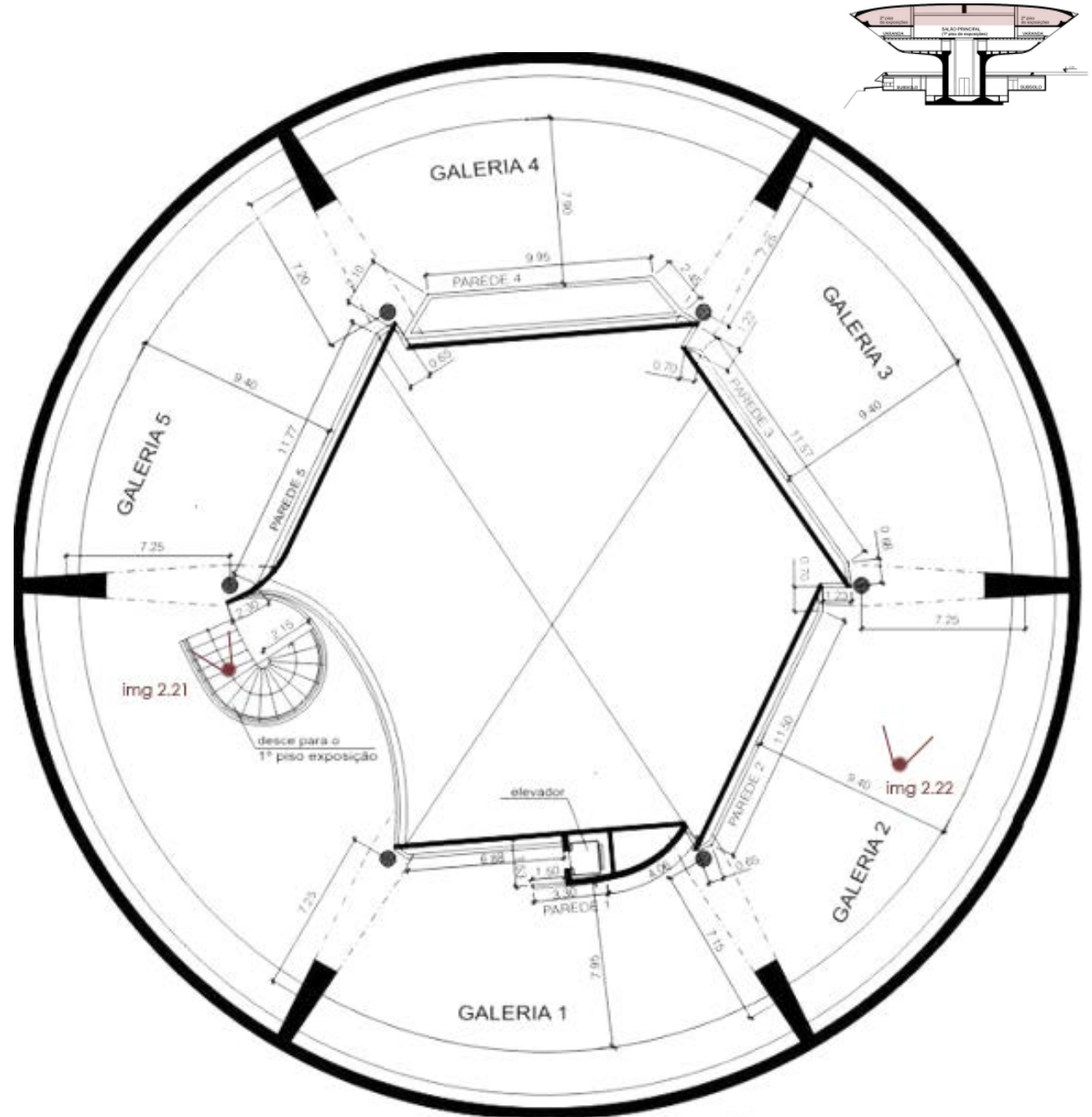
Escala 1:300



Imagen 2.21 Acceso a la planta superior de galerías



Imagen 2.22 Galería de exposiciones



PLANTA TERCERA

Escala 1:300

2.4 MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

Para poder construir las formas curvas y orgánicas que diseña Niemeyer, se necesita un material plástico y moldeable, capaz de adaptarse a cualquier geometría. Por ello, Niemeyer utiliza el hormigón como material constructivo principal en la mayoría de sus proyectos.

Además, el hormigón es un material con una capacidad estructural que le permite, no solo utilizarlo para crear las formas y geometrías sinuosas, sino también para sustentarlas, para crear la estructura portante. Muchas veces, la propia "carcasa" del edificio conforma también la estructura. El hormigón armado consigue que un mismo elemento responda a esta dualidad forma orgánica – estructura, gracias a su plasticidad y su capacidad portante respectivamente.

En la imagen 2.23 vemos dos ejemplos de algunas de las obras de Niemeyer en las que destaca esta dualidad resuelta con hormigón armado.



Imagen 2.23 Izquierda: Iglesia San Francisco de Asís, Conjunto Pampulha, en Belo Horizonte. Derecha: Sede de la Fundación Oscar Niemeyer, "Caminho Niemeyer", en Niterói

En el caso del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói, Niemeyer no duda en utilizar también el hormigón armado como material principal del edificio. El hormigón armado se utiliza también para la estructura, pero en este caso la estructura y la piel del edificio está diferenciada, al menos en algunas de sus partes.

En el cilindro central, encargado de transmitir todas las acciones hasta el terreno, se funde estructura y cerramiento. También en la primera planta,



Imagen 2.24 Museo de Arte Contemporáneo de Niterói, vista del soporte central y de la parte inferior del primer forjado

el propio forjado de hormigón genera la superficie curva que dará el aspecto de "copa" del edificio (imagen 2.24).

Aunque, como se ha dicho anteriormente, en gran parte del edificio la piel no tiene función estructural, la forma curva de "copa" o "cúpula invertida" que Niemeyer moldea para el cerramiento del museo ayuda a un mejor funcionamiento estructural del edificio.

El principal material utilizado, el hormigón, se enfosca y pinta de color blanco dándole elegancia y unidad al edificio. La sensación de pesadez y robustez del hormigón disminuye debido a tres factores ya comentados anteriormente. Por una parte, la forma del museo: la existencia de un único apoyo central y el gran voladizo hace que parezca que está levitando. En segundo lugar, la rasgadura perimetral, y por último, la lámina de agua situada debajo del museo. Estos tres elementos contrarrestan la apariencia maciza y pesada del hormigón, otorgándole un aspecto de ligereza al conjunto del edificio. Además, el color blanco con el que se reviste el hormigón también favorece esta sensación.

Algo a lo que Niemeyer también otorga mucha importancia es a la plaza pública que sirve de preludio al museo. Niemeyer deja la plaza prácticamente libre en todo su espacio, colocando únicamente la rampa de acceso al museo. La plaza está compuesta por dos materiales. El material predominante son las placas de hormigón de grandes dimensiones (aproximadamente 3 X 2 metros) de tono grisáceo. El otro material utilizado para la composición de la plaza es el agua, dispuesta mediante una lámina de agua colocada en la proyección del museo sobre la plaza.



Imagen 2.25 Vista de la plaza, en relación con el entorno y con el MAC. La lámina de agua simula que el edificio flota sobre la propia bahía

Conjugando estos dos materiales Niemeyer consigue relacionar el museo y la plaza con el paisaje. Se observa un claro vínculo del pétreo artificial gris que es el hormigón con las montañas del entorno, y de la lámina de agua con el agua de la bahía (imagen 2.25).

Por otra parte, ambos elementos están estrechamente relacionados con el propio museo: el hormigón, mismo material tanto para el pavimento de la plaza como para el cuerpo del edificio, aunque con diferencia de



Imagen 2.26 Relación de la materialidad del pavimento de la plaza con el museo y con las montañas del fondo

tonalidad (imagen 2.26); y la lámina de agua, que marca la proyección del museo, y que, al situarse justo en el borde de la plaza, parece una prolongación del agua de la bahía, dando la sensación de que el museo está flotando en ella (imagen 2.25). De este modo, la lámina de agua consigue aportar la ligereza anteriormente comentada.

Sobre la vacía plaza del museo se dispone una sinuosa rampa que nos eleva hasta la altura de la primera planta del museo (imágenes 2.25 y 2.26), donde se produce el acceso a la zona administrativa. La rampa continúa haciendo un giro de 360°, y remontando otros 3 metros de altura hasta llegar al acceso principal en la planta segunda. Esta sinuosa rampa nos ofrece un paseo elevado cargado de espectaculares vistas en todas las direcciones gracias a las curvas de su recorrido. La geometría de esta rampa, que vemos en la imagen 2.27, está acorde con la pasión que tiene Niemeyer por la curva, y con la voluntad de aprovechar al máximo las vistas del entorno del MAC.

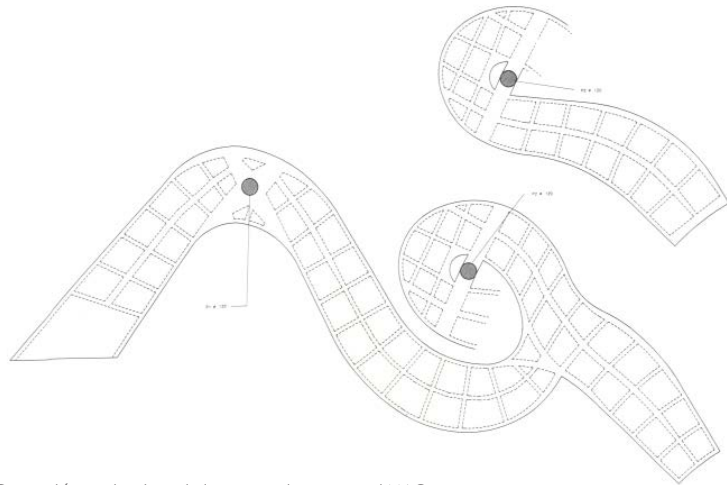


Imagen 2.27 Geometría y estructura de la rampa de acceso al MAC

En cuanto a la materialidad de la rampa, se usa el mismo material que en el resto del proyecto: el hormigón. Sin embargo en este caso se decide enfatizar el pavimento de la rampa, y se ejecuta mediante un hormigón con pigmento rojo que le da el color vivo que vemos en la imagen 2.29. El rojo del pavimento contrasta con el hormigón blanco de los antepechos de la rampa y del museo, dando un toque de color y distinción en esta armonía de blancos y grises. De este modo Niemeyer consigue acentuar la importancia del recorrido sinuoso y de la curva, a la vez que marca el acceso al museo.

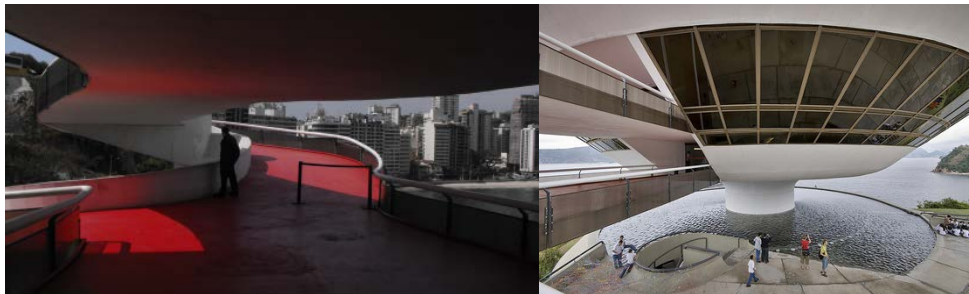


Imagen 2.28 Acceso y encuentro de la rampa con el edificio



Imagen 2.29 Vista de la rampa a nivel de peatón desde el inicio. Destaca el color rojo frente al blanco del resto del MAC

Tal y como vemos en la imagen 2.30a, el color blanco sigue siendo el predominante también en el interior del museo. Gracias a este color neutro, el museo es capaz de albergar cualquier tipo de exposición, de pintura, escultura etc, sin molestar ni alterar la percepción de los elementos expuestos. Además, es un color que permite jugar con los tonos de luz y crear cualquier color en un determinado momento o espacio.

La luz natural solo aparece en la planta segunda, a través de la rasgadura perimetral que ocupa prácticamente toda la altura, como se observa en la imagen 2.30b. Este hueco continuo que da la vuelta a todo el edificio está formado por 70 planchas de cristal triplex, fabricadas exclusivamente para el proyecto. Cada hoja de vidrio tiene unas dimensiones de 4,8 metros de altura por 1,85 de ancho y 18 mm de espesor, y están colocadas con una inclinación de 40° respecto a la horizontal. Un banco corrido junto a la ventana nos permite disfrutar tanto de las vistas del exterior como de las obras expuestas en el interior (imagen 2.30b).



Imagen 2.30 Izquierda: interior de la sala principal Derecha: galería de la planta primera. Luz natural y artificial.

Como se ha comentado anteriormente, la estructura que conforma la totalidad del edificio es de hormigón. La ejecución de esta singular estructura no fue sencilla, debido a la gran cantidad de m^3 de hormigón, a las dimensiones de las piezas, y a la forma del proyecto que obligaba a usar encofrados curvos. Como veremos en el próximo apartado, y tal y como se observa en la imagen 2.31, algunos de los elementos estructurales requerirán armadura postesada. Éste es el caso de las vigas superiores en cruz, y de las vigas pared de la planta primera.



Imagen 2.31 Tensores de la armadura postesada de las vigas pared de planta primera



Imagen 2.32 Armadura de espera para el encuentro de la rampa con el acceso al museo

En el resto de elementos donde la única armadura que actúa es la pasiva, se colocan grandes cantidades de hierro. Éste es el caso del encuentro de la rampa con el acceso al museo (imagen 2.32), y de la unión de la cimentación con el arranque del cilindro central (imagen 2.33).



Imagen 2.33 Armadura pasiva de la cimentación y arranque del cilindro central

Debido al funcionamiento del sistema estructural del edificio, que se explica en el apartado 3.1, la estructura no puede funcionar hasta no estar construida en su conjunto. Es por esto que en la imagen 2.34 vemos el edificio completamente apuntalado, ya que se encuentra en una fase intermedia de construcción. El último elemento en construirse fue la singular rampa que sirve de acceso y que apoya sobre el edificio. En la imagen 2.35 vemos la rampa en fase de ejecución.



Imagen 2.34 Estructura en construcción



Imagen 2.35 Construcción de la rampa de acceso

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA

En el diseño del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói, Oscar Niemeyer se enfrenta a tener que dar una solución constructiva y estructural, a esa flor que emerge de la tierra y parece que levita sobre el mar.

La forma que propone Niemeyer para el MAC, mediante la cual pretende dar ligereza al edificio y relacionarlo con el entorno, debe de poder construirse, sustentarse y ser estable. Es necesario un esqueleto estructural capaz de construir ese volumen y de materializar las ideas y sensaciones buscadas por el arquitecto.

Sin embargo, Niemeyer entiende que la estructura no es algo que se decida a posteriori y que se adhiera al proyecto, sino que forma parte de la idea generadora de éste. No debemos entender la estructura como una disciplina distinta, diferente de la arquitectura, sino como una parte de ella. Más allá de una solución para que el edificio se tenga en pie, la estructura es un recurso con el que proyectar.

Ya en los primeros bocetos Niemeyer tantea la forma y la geometría a la par que visualiza como va a funcionar estructuralmente el edificio. En la imagen 3.1 se muestra uno de los bocetos iniciales del proyecto en el que Niemeyer ya enfatiza la importancia del apoyo central a partir del cual se ramifica la estructura a modo de árbol.

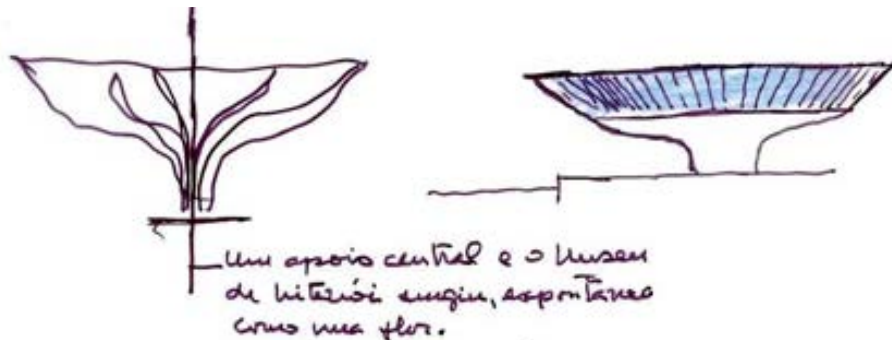


Imagen 3.1 Boceto de idea inicial en el que se muestra ya el funcionamiento estructural



Imagen 3.2 Funcionamiento estructural de una copa y de un árbol (acacia africana)

La forma de copa o de flor no es sólo un aspecto formal que busca Niemeyer, sino que responde también a una necesidad estructural. Una copa, o un árbol (imagen 3.2) son elementos con un buen comportamiento estructural. El arquitecto brasileño se fijó en ellos y en su modo de sustentarse y lo trasladó a su proyecto para el Museo de Arte Contemporáneo de Niterói (imagen 3.3).



Imagen 3.3 Museo de Arte Contemporáneo de Niterói

La singular estructura del MAC de Niterói podríamos diferenciarla conceptualmente en tres partes: la parte enterrada, el apoyo central, y el cuerpo principal.

La parte central de la estructura forma una especie de tablero homogéneo sobre el que se apoyará el cuerpo principal estructural. Para crear esta base portante, un gran cilindro hueco de 9 metros de diámetro y 1 metro de espesor emerge del terreno y se eleva 5 metros sobre el nivel del suelo. En la parte superior del cilindro se construye un forjado aligerado de canto variable. Este forjado de hormigón tiene un canto de 40 cm en el extremo del voladizo, y se ensancha gradualmente hasta su encuentro con el apoyo central. En esta unión el forjado pasa a formar parte del propio cilindro, creando un cuerpo de revolución como el de una copa, y otorgándole mayor resistencia y rigidez.

Sobre esta estructura monolítica se apoyará el resto de la estructura aérea. En primer lugar, sobre el primer forjado descansan 6 vigas pared dispuestas de forma radial, generando la distribución en planta dividida en 6 sectores que se ha comentado anteriormente. Estas vigas, sobre las que descansa el forjado segundo, se unen al cilindro central ocupando la altura total de la planta primera (2,6 m). De cada una de las vigas nace un soporte cilíndrico de hormigón, con una altura de dos plantas. En su cabeza se apoya el cuadro de vigas de hormigón postesadas. Estas vigas se entrelazan en forma de estrella, es decir, apoyando en un pilar y en el siguiente no consecutivo, para dar así mayor estabilidad y rigidez al conjunto. El forjado tercero queda colgado del extremo de estas vigas, y apoyado en los seis soportes. Finalmente, la cubierta descansa sobre el cuadro de vigas superior, creando una forma abovedada.

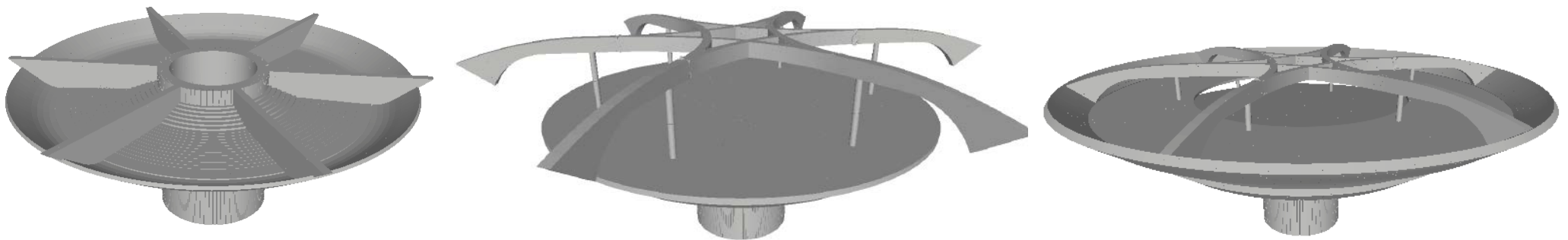


Imagen 3.4 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes

La tercera parte de la estructura es la que se encuentra enterrada. El cilindro central que sirve de único apoyo de la estructura está parcialmente enterrado: tiene una altura total de 9,75 metros, de los cuales 5 están sobre el nivel del suelo y 4,75 por debajo. Este gran soporte apoya sobre una especie de zapata circular de 2 m de altura y 16,8 m de diámetro, encargada de recibir todas las cargas del edificio y transmitir las al terreno. Los espacios enterrados como son la cafetería, el auditorio y la cocina se sitúan sobre esta zapata, y disponen de una estructura convencional de muros. La zona reservada a instalaciones, que se construye separada del resto, está también enterrada y realizada mediante una estructura de muros.

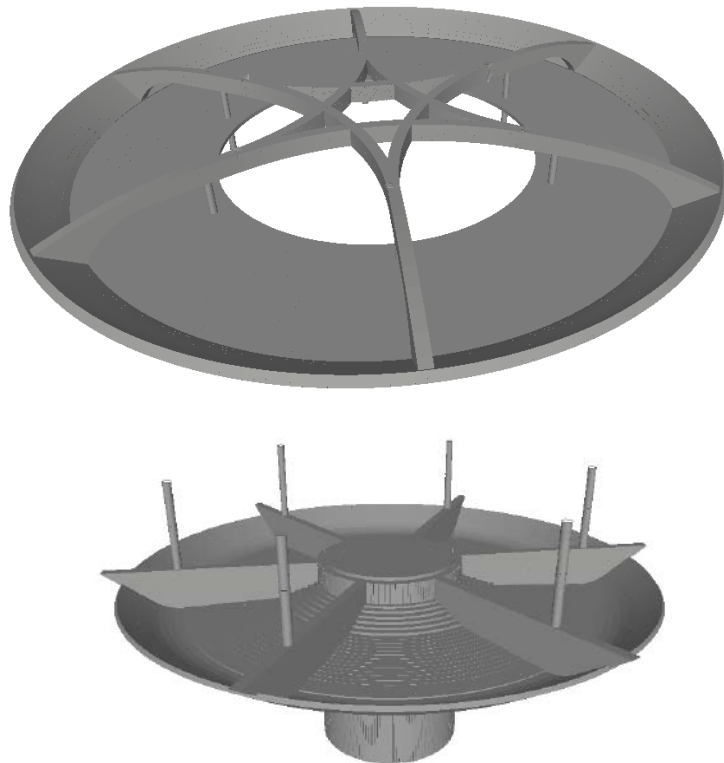


Imagen 3.5 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes

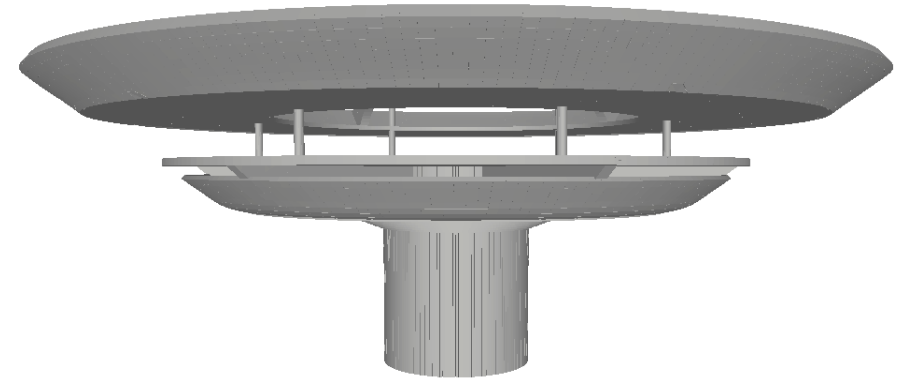


Imagen 3.6 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói. Alzado

En resumen, la estructura está formada básicamente por dos partes (imagen 3.5): la parte inferior, formada por el apoyo central y el primer forjado, a modo de base monolítica encargada de recibir todas las cargas del edificio; y el resto de la estructura que apoya como una mesa de 6 patas sobre este tablero. Las vigas y forjados tienen grandes luces y voladizos, por lo que, además de construir una estructura adecuada que trabaje correctamente, se deben utilizar grandes cantos y mecanismos como el postesado que permitan el correcto funcionamiento de la estructura y poder así absorber los diferentes esfuerzos.

Es importante destacar la estrecha vinculación entre la estructura y el programa y organización del museo. Como se ha comentado anteriormente, Niemeyer entiende que ambos conceptos deben estar ligados desde el momento inicial del proyecto. Tal es la vinculación, que la propia estructura es la que compartimenta la planta primera, y delimita espacialmente las distintas galerías en las plantas superiores. En definitiva, ni el proyecto podría ser construido con otra estructura y conseguir las mismas sensaciones, ni esta estructura sirve para otro proyecto distinto. No van el diseño y la estructura por separado, sino que es un único concepto indivisible.

3.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y SU MODELIZACIÓN

Para estudiar el comportamiento de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói se ha realizado una modelización virtual con la ayuda del programa informático Architrave®. En este modelado se ha construido únicamente la parte de la estructura aérea, obviando la estructura convencional de los espacios enterrados ya que es independiente de la estructura singular del museo. También se ha despreciado la presencia de la rampa de acceso, cuya estructura portante es también independiente de la del resto del museo.

Debido a las grandes dimensiones y geometrías complejas de todos los elementos que componen la estructura, estos no se pueden modelizar como barras, sino que se tratan como elementos superficiales que se calculan mediante el método de elementos finitos. De este modo, la proximidad del modelado con la realidad es mayor. Los pilares son una excepción y si que se modelizan como barras ya que si que funcionan como tal.

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Este método consiste en dividir un elemento estructural superficial en muchos elementos más pequeños que están interconectados (imagen 3.7). Cada una de estas subdivisiones es un elemento finito al que se les asignan unas condiciones de contorno, ecuaciones de equilibrio y ecuaciones constitutivas (tensión – deformación). El software informático se encarga de resolver el sistema

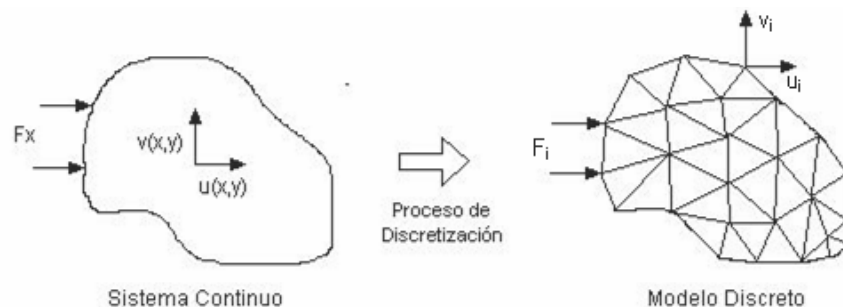


Imagen 3.7 Discretización de una geometría real a una modelización de elementos finitos

de ecuaciones para cada uno de los elementos, mostrando los resultados globales de la estructura.

El cálculo mediante elementos finitos permite un estudio detallado sobre las solicitaciones, tensiones y deformaciones de cada punto dentro de una gran malla superficial, lo que lo hace especialmente adecuado para edificios con gran presencia de elementos estructurales superficiales como es el MAC de Niterói. Se trata de un método aproximado, pero muy preciso si se ejecuta correctamente. Para obtener unos buenos resultados que se aproximen a la realidad se debe realizar un correcto modelado (condiciones de contorno, tipo de uniones etc). Además, cuanto más pequeños sean los elementos finitos mayor será la precisión, tanto para calcular las ecuaciones diferenciales, como para adaptarse a la geometría real del elemento estructural.

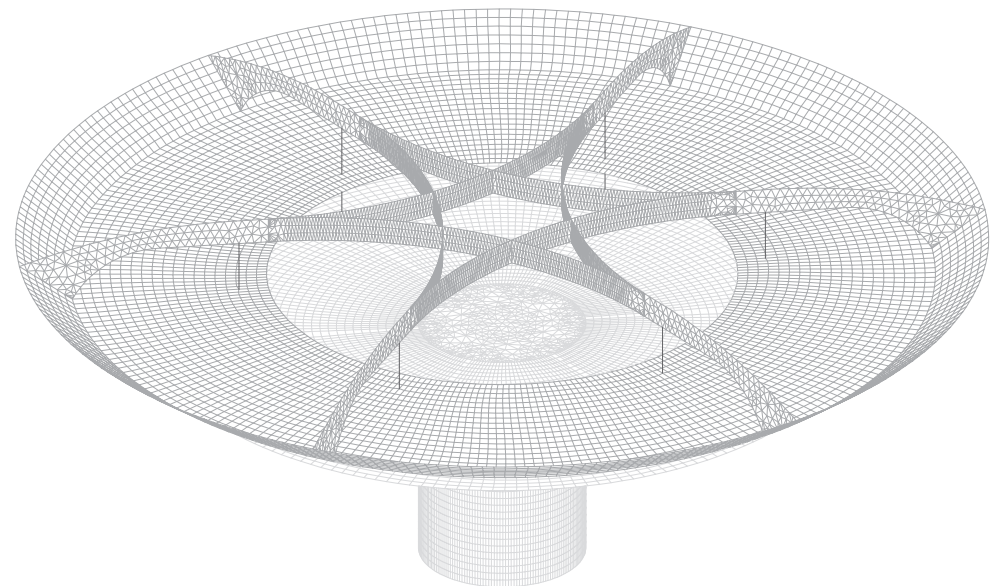


Imagen 3.8 Discretización del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói en elementos finitos

Para la modelización del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói se han utilizado elementos finitos tanto triangulares como cuadrados, según fuera más conveniente para adaptarse a la geometría. Un total de 65.606 elementos finitos componen el modelado del museo. A los elementos finitos se les ha asignado un hormigón HA-25, con un módulo de elasticidad de 28.000 N/mm^2 , un coeficiente de Poisson de 0,2 y un peso específico de 25 kN/m^3 .

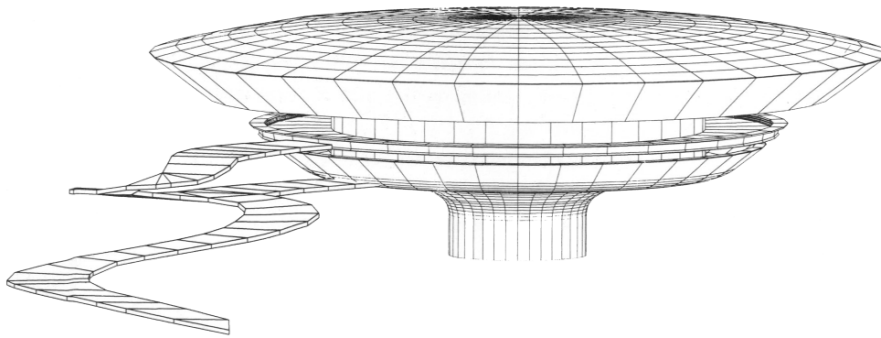


Imagen 3.9 Posible discretización del MAC de Niterói en elementos finitos

En primer lugar, el soporte central se ha modelizado como un cilindro de 8 m de diámetro y 12,36 m de altura, formado por elementos finitos rectangulares de $37 \times 14 \text{ cm}$ y 1 m de espesor. Con este metro de espesor se alcanzan los 9 metros de diámetro reales del cilindro. En la realidad esta gran columna descansa sobre una importante cimentación circular de 2 m de altura y 16,8 m de diámetro. Tal y como se ve en la imagen 3.10, en el modelo esta cimentación se ha sustituido por una serie de empotramientos perimetrales en la base del soporte: uno por cada elemento finito en contacto con el terreno (186 en total). En el modelo se ha considerado que la altura del apoyo central llega hasta el segundo forjado, generando un encuentro entre el canto de las vigas pared y el propio cilindro para conseguir una unión más rígida. En total, 6138 elementos finitos rectangulares crean este elemento estructural encargado de trasladar la totalidad de las cargas del edificio hasta la cimentación trabajando básicamente a compresión.

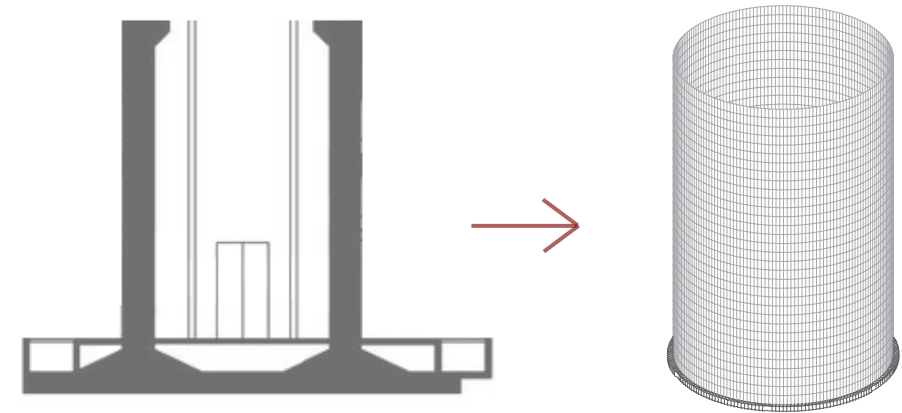


Imagen 3.10 Modelización del cilindro central y la cimentación en elementos finitos

Sobre el apoyo central se coloca el primer forjado, construido como una losa aligerada de hormigón armado. Este forjado se modeliza con elementos finitos rectangulares de tamaño variable para adaptarse a la geometría de corona circular (imagen 3.11). En la zona más cercana al centro de la circunferencia los elementos finitos tienen una superficie de $0,05 \text{ m}^2$ (500 cm^2) mientras que en el perímetro son de aproximadamente $0,14 \text{ m}^2$. Podemos decir que de media los elementos finitos que forman el primer forjado miden unos $40 \times 30 \text{ cm}$.

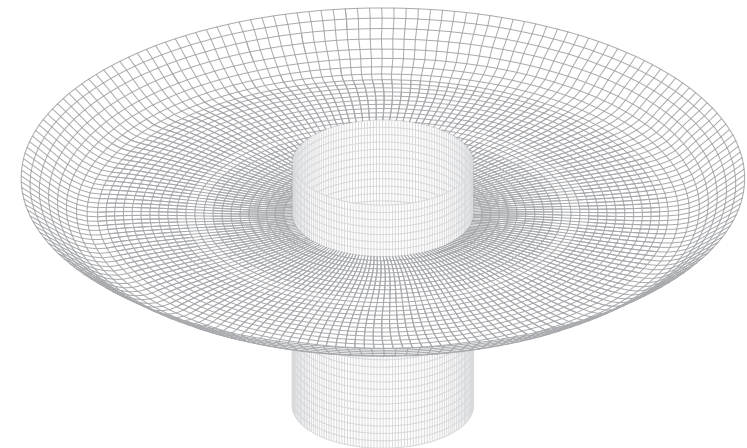


Imagen 3.11 Modelización del primer forjado en elementos finitos

Como se ha comentado anteriormente, el canto de este forjado es variable, aumentando gradualmente de los 40 cm de espesor en el extremo del voladizo, hasta llegar a tener la altura total del cilindro. Para la modelización informática, se asigna un espesor máximo de 300 cm a los elementos finitos en contacto directo con el cilindro central, que disminuye rápidamente hasta los 90 cm de espesor en saltos de 30 cm. A partir de aquí se reduce de manera más suave (saltos de 4 cm) hasta llegar a un mínimo de 42 cm en el perímetro.

Para aplicar el método de los elementos finitos hay que tener en cuenta que los vértices de cada uno de los elementos deben estar en contacto. El programa de cálculo utilizado adopta el dibujo del elemento finito como el centro del espesor total del mismo. Teniendo en cuenta estos dos factores, el modelado de este primer forjado queda tal y como se muestra en la imagen 3.12a en lugar de cómo debería ser en la realidad (imagen 3.12b). No obstante esta diferencia no afecta al cálculo estructural por lo que se puede despreciar el error y admitir esta modelización.

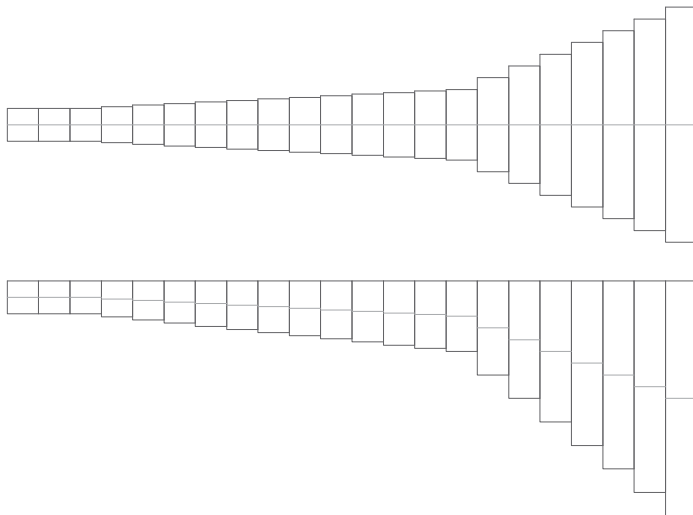


Imagen 3.12 Elementos finitos representados con espesor. a) superior: modelización real b) inferior: modelización correcta

Sobre el primer forjado, y unido a la parte superior del apoyo central, se colocan unas vigas pared de 2,6 metros de altura que ocupan toda la altura libre de la planta y tienen una longitud en su cara superior de 13,25m. En el extremo del voladizo el canto de la viga disminuye debido a la inclinación del forjado inferior. En la realidad estas vigas son de hormigón postesado, con una serie de tensores colocados según se ve en la imagen 3.13.

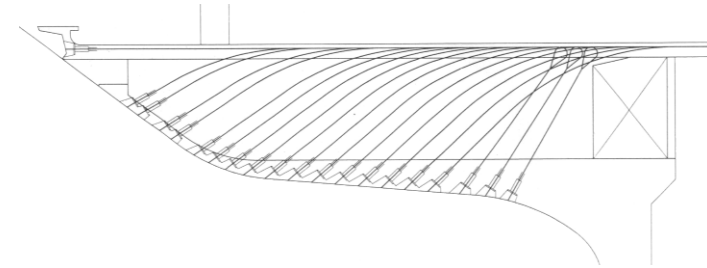


Imagen 3.13 Tensores de las vigas inferiores de hormigón postesado

Estas vigas de grandes dimensiones están modelizadas mediante elementos finitos colocados en vertical, donde el espesor asignado al elemento finito (60 cm) corresponde con la anchura real de la viga. Debido a su compleja geometría, se utilizan elementos finitos triangulares, de un tamaño constante alrededor de los 750 cm².

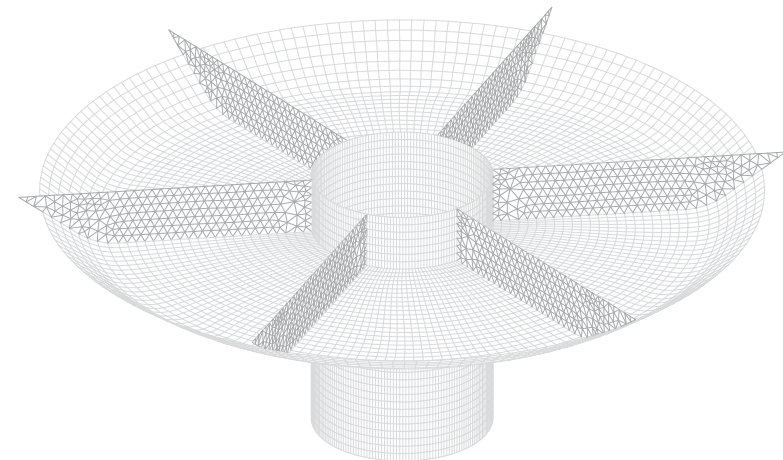


Imagen 3.14 Modelización de las vigas inferiores en elementos finitos

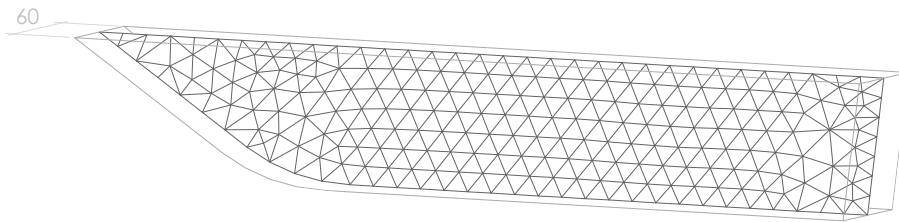


Imagen 3.15 Modelización de las vigas inferiores en elementos finitos

El segundo forjado está construido con una losa aligerada de hormigón armado de 40 cm de canto, que se apoya directamente sobre las vigas inferiores. Este forjado está aligerado mediante casetones según la distribución que se ve en la imagen 3.16. Tiene una luz de 4 metros en la zona más próxima al cilindro central, mientras que en la parte más alejada llega a tener una luz máxima de 17 metros. Para poder cubrir estas luces, el extremo del forjado se ensancha con un zuncho de 80 cm de altura. Al modelizar este forjado, se supone una losa maciza de canto equivalente a un forjado aligerado de 40 cm de canto. Además se desprecia la existencia del zuncho perimetral macizado, ya que el forjado entero se modeliza como macizo.

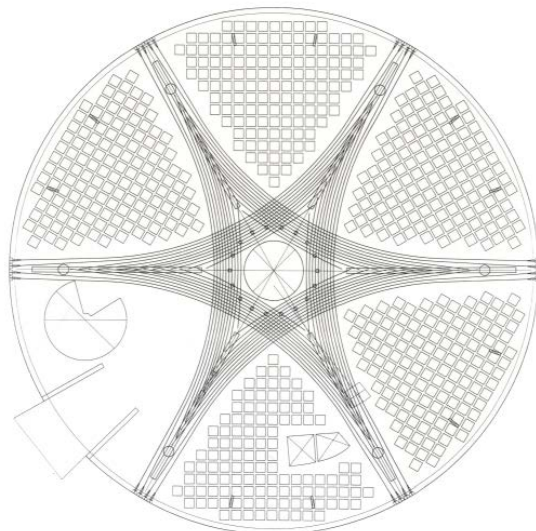


Imagen 3.16 Armado y casetones del segundo forjado

El modelado de este elemento estructural se realiza en dos partes (la corona exterior y la zona central) para que la distribución de los elementos finitos se adapte mejor a la geometría. En primer lugar, la zona de la corona exterior que apoya sobre las vigas inferiores se modeliza con elementos finitos rectangulares de entre 0,2 y 0,06 m². Por otra parte, en la circunferencia central la modelización se realiza con elementos triangulares de superficie variable (alrededor de 0,1 m²) para poder adaptarse a la geometría (imagen 3.17). Esta separación es únicamente teórica para generar los elementos finitos que conforman el forjado y no afecta a la concepción del forjado como un único elemento monolítico. En todo el forjado el espesor de los elementos finitos es de 35 cm.

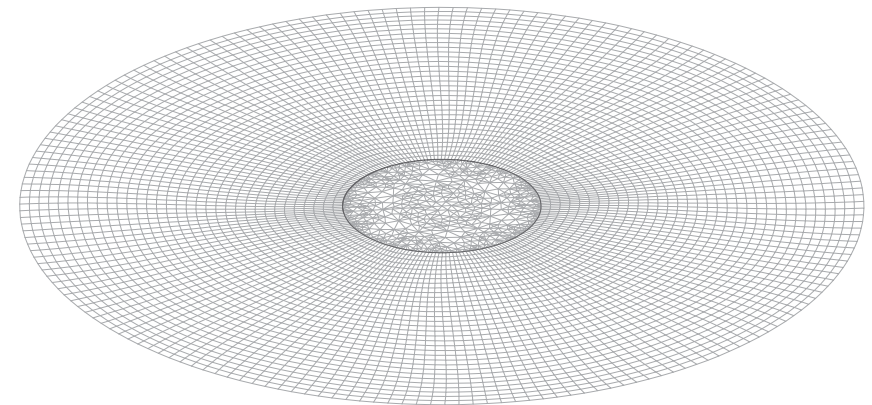


Imagen 3.17 Modelización del forjado segundo en elementos finitos

Los pilares que unen el cuadro de vigas superiores con las vigas pared inferiores son los únicos elementos que se modelizan como barras, y no con elementos finitos. Los pilares son circulares, de 65 cm de diámetro, y se colocan directamente sobre las vigas inferiores, a una distancia de 4,4 metros del extremo volado. Los pilares tienen una altura total de 5,25 metros que cubre las dos plantas superiores. Cada pilar se modeliza como dos barras independientes, la inferior de 2,72 metros de altura y la superior de 2,52 metros. Al igual que el resto de elementos finitos, el hormigón utilizado para los pilares es también HA-25.

El tercer y último forjado tiene un gran hueco circular en su interior que forma la doble altura de la sala principal de exposiciones. Esta corona circular se apoya en la parte interior sobre los pilares antes mencionados, mientras que en los extremos es sujeta por las vigas superiores que veremos a continuación.

Este forjado está compuesto por una losa maciza de 30 cm de canto, cuya luz varía de los 11 a los 23 metros según nos encontremos en la zona más próxima al centro del edificio, o en la zona periférica. La distancia entre los pilares que soportan este forjado es de 12,9 metros, mientras que la distancia entre las cabezas de las vigas de las que cuelga es de 21 metros. Los elementos finitos que forman esta corona circular son rectangulares y tienen un tamaño de entre 0,13 y 0,23 m², y 30 cm de espesor (imagen 3.18). En el perímetro, el forjado se inclina unos 40°, hasta llegar a la altura total de la planta. En esta posición inclinada es donde tendrá lugar la unión entre las vigas superiores y el forjado.



Imagen 3.18 Modelización del tercer forjado en elementos finitos

En la parte superior del museo, y para soportar la cubierta y el último forjado, aparecen 6 vigas curvas de gran canto. Estas vigas, que apoyan en pilares no consecutivos, forman un cuadro de vigas en forma de estrella que da gran estabilidad al conjunto (imagen 3.19). Estos elementos estructurales, clave en la estructura del proyecto, tienen unas dimensiones de 125 cm de canto por 75 de ancho. En el extremo donde la viga se une con el forjado pasa a ocupar toda la altura de la planta (2,75 metros de canto). Para estas piezas se realiza un armado postesado, que aumenta la capacidad resistente de las piezas a flexión, y permite reducir la cantidad de armadura pasiva y el canto.

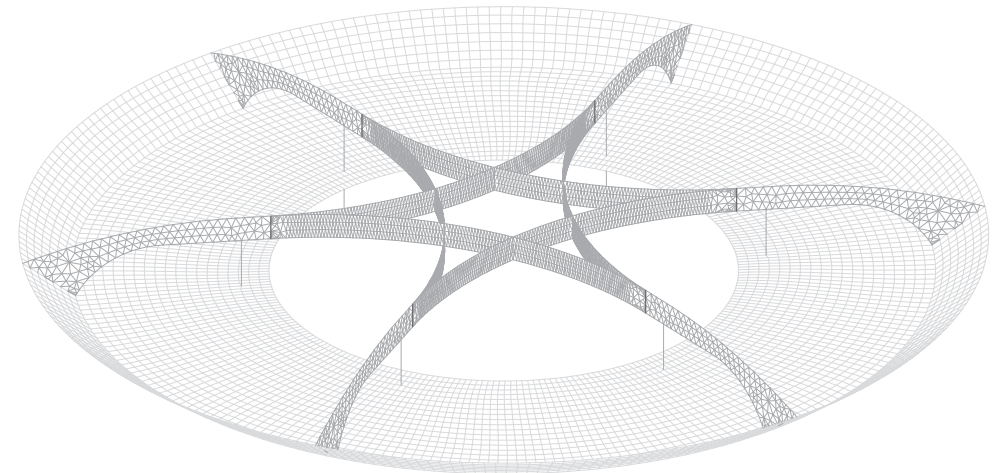


Imagen 3.19 Modelización de las vigas superiores en elementos finitos. Unión con los pilares y con el forjado que sustenta

Estas peculiares vigas curvas tienen una geometría muy compleja (canto variable, directriz curva, encuentros singulares, etc) por lo que se modelizan en dos partes. Por una parte, las zonas extremas, de canto variable y con directriz recta, y por otra parte la zona central, de canto constante de 1,25 m, y con una directriz curva (imagen 3.20). La parte recta va desde la unión con el forjado inferior hasta apoyar en el pilar correspondiente, mientras que la parte curva va de un pilar al siguiente no consecutivo. Con este sistema se consigue generar una estructura en forma de estrella que trabaja conjuntamente, en vez de distintas vigas que trabajan por separado. Gracias a este modo de trabajar global, la estructura es más estable y las vigas pueden llegar a alcanzar luces de 22,3 metros entre pilares y voladizos de 11 metros.

Tanto las partes rectas de canto variable como los tramos curvos que forman el conjunto de las vigas están formadas por pequeños elementos finitos triangulares dispuestos en vertical, capaces de adaptarse a las peculiaridades geométricas. En las zonas centrales de las vigas estos elementos finitos tienen una superficie de alrededor de 0,03 m² mientras que en las partes rectas llegan a los 0,1 m². En todos los casos el espesor es de 75 cm.

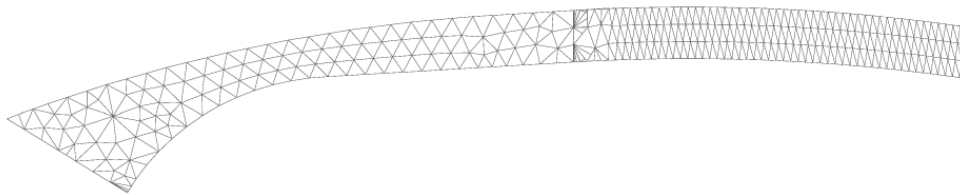


Imagen 3.20 Modelización en dos partes de las vigas superiores

Como se ha comentado anteriormente, es muy importante que los vértices de los elementos finitos coincidan, y que no haya ningún vértice en contacto con una cara del elemento finito. Esto, sumado a la complejidad de la geometría singular del museo hace más complicada la modelización del edificio. Por este motivo, la mayor parte del modelo se ha realizado por sectores, es decir, construyendo una de las 6 fracciones que forman el edificio y repitiendo este modelado 6 veces mediante una matriz polar. No obstante, se ha tenido que modificar manualmente gran parte de los nudos de los elementos finitos para que estuviesen correctamente conectados.

En el caso de las vigas superiores la complejidad del modelado es aún mayor, ya que a las dificultades anteriores hay que añadirle la complicación del entrelazado de las vigas y del apoyo sobre pilares no consecutivos. Esto impedía reproducir 6 veces un sector del edificio como se ha hecho en el resto de elementos, teniendo que recurrir a modelar una de las vigas (por partes tal y como se ha comentado anteriormente) y realizar una matriz polar de la misma. Una vez construido el gran cuadro de vigas, se ha tenido que ajustar manualmente cada encuentro entre las distintas vigas.

3.3 ASIGNACIÓN DE CARGAS

Para la asignación de cargas sobre la estructura del MAC de Niterói se seguirá lo establecido en el CTE, en concreto el Documenta Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la edificación. Se establecen 3 tipos de cargas distintas: permanentes, variables y accidentales. Para el análisis del museo de Niterói se tendrán en cuenta únicamente las permanentes y las variables de uso. Dada la complejidad del modelo informático y la gran envergadura del trabajo, no se aplicaran las cargas variables de viento ni las acciones accidentales como el sismo y el incendio. Se sugiere, como otro futuro trabajo de Grado, el estudio de esta interesante estructura bajo el efecto de estas acciones.

CARGAS PERMANENTES

Las cargas permanentes son básicamente las formadas por el peso propio de la estructura y de los elementos constructivos como pavimentos, tabiquería, cerramientos, falsos techos etc, además del posible mobiliario o maquinaria fija. En lo referente al MAC de Niterói, consideramos que el peso propio de la estructura supone un porcentaje muy elevado de las cargas gravitatorias permanentes totales, ya que se trata de una estructura pesada de hormigón armado.

PLANTA PRIMERA (Administración):

Forjado reticular aligerado de hormigón armado de canto variable
de 5 a 15 kN/m²

Tabiquería: ordinaria con distribución uniforme
1 kN/m²

Pavimento de linóleo de 20 mm
0,5 kN/m²

PLANTA SEGUNDA (sala de exposiciones principal):

Forjado reticular aligerado de hormigón armado de 40 cm de canto
6 kN/m²

Tabiquería: escasa tabiquería colocada puntualmente
1,2 kN/ml

Pavimento de linóleo de 20 mm
0,5 kN/m²

Instalaciones colgadas y falso techo
0,32 + 0,18 kN / m² = 0,5 kN/m²

PLANTA TERCERA (galerías de exposiciones):

Losa maciza de hormigón armado de 30 cm de canto
7,5 kN/m²

Tabiquería: escasa tabiquería colocada puntualmente
1,2 kN/ml

Pavimento de linóleo de 20 mm
0,5 kN/m²

Instalaciones colgadas y falso techo
0,5 kN/m²

CUBIERTA:

Losa maciza de hormigón armado de 30 cm de canto
7,5 kN/m²

Instalaciones colgadas y falso techo
0,5 kN/m²

Teniendo en cuenta que, además del peso propio de los forjados, también actúa el peso de otros elementos estructurales como las vigas de gran canto y los soportes, se puede considerar que el peso de la estructura supone un 95% del total del peso propio. Según este planteamiento, podemos considerar que el peso de la escasa tabiquería y del pavimento es despreciable en relación al total de las cargas permanentes. Por este motivo, se simplifican las cargas permanentes sustituyendo el peso propio de tabiquería, pavimento y falsos techos por un incremento del 5% respecto del peso propio de la estructura. Según el código técnico de la edificación, las cargas permanentes se deben mayorar multiplicando su valor por un coeficiente de 1,35. Para añadir este 5% correspondiente al resto de cargas permanentes, el coeficiente utilizado es de 1,4.

El software informático utilizado para el análisis (Architrave®) tiene en cuenta el peso del material al indicar que es un hormigón HA-25 y el espesor en cada tramo. Por este motivo, no es necesario introducir de manera externa las cargas correspondientes al peso propio de la estructura. Además, como hemos considerado que el resto de cargas permanentes suponen un incremento del 5% que añadiremos al coeficiente de mayoración de cargas, no es necesario asignar ninguna carga permanente adicional.

CARGAS VARIABLES

Entendemos por cargas variables aquellas que no tienen un carácter permanente, es decir, que actúan únicamente durante un intervalo de tiempo. Además el valor de la carga en el momento que actúa no es constante. Las cargas variables más significativas son la sobrecarga de uso, el viento, y la sobrecarga de nieve. Para el caso del museo que estamos analizando, se puede despreciar la sobrecarga de nieve debido al clima tropical en el que se encuentra ubicado. La carga horizontal de viento tampoco se va a analizar debido a la complejidad que esto añade al modelo y al análisis. Queda abierta la posibilidad de realizar un estudio sobre el efecto del viento en el MAC como ampliación a este trabajo o como un posible trabajo independiente.

No obstante conviene recordar que el edificio diseñado por Niemeyer está construido para soportar vientos de hasta 200 km / hora.

En cuanto a la sobrecarga de uso, se establece lo recogido en la tabla "3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso" del DB SE - Acciones en la edificación del CTE: sobrecarga de uso de 5kN/m² en la zona destinada a museo, y 2kN/m² en las zonas administrativas (imagen 3.21).

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20° Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁶⁾	1 ⁽⁴⁾ ⁽⁸⁾	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

SE-AE 5

Imagen 3.21 Tabla 3.1 del DB SE-AE. Capítulo 3 Acciones variables

PLANTA PRIMERA (Administración):	2 kN/m ²
PLANTA SEGUNDA (sala de exposiciones principal):	5 kN/m ²
PLANTA TERCERA (galerías de exposiciones):	5 kN/m ²
CUBIERTA: accesible solo para mantenimiento:	1 kN/m ²

En el modelado por ordenador, se asigna una carga superficial independiente a cada uno de los elementos finitos. Estas cargas son en todo caso verticales respecto del plano del suelo.

TABLA RESUMEN

PLANTA	ACCIONES PERMANENTES*	ACCIONES VARIABLES
PRIMERA (administración)	Superficiales: de 6,5 a 17 kN/m ² según el espesor	2 kN/m ²
SEGUNDA (sala principal)	Superficiales: 7 kN/m ² Lineales (tabiquería): 1,2 kN/ml	5 kN/m ²
TERCERA (galerías de exposiciones)	Superficiales: 8,5 kN/m ² Lineales (tabiquería): 1,2 kN/ml	5 kN/m ²
CUBIERTA	Superficiales: 8 kN/m ²	1 kN/m ²

Tabla 3.1 Resumen de acciones sobre la estructura

* Como se ha comentado anteriormente, se considera que el peso de la estructura supone un 95% de las cargas permanentes totales, siendo despreciable el peso de tabiquería, pavimentos y falsos techos. De este modo, en el modelo el peso propio de estos elementos se sustituye por un incremento del 5% del coeficiente de seguridad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPORTAMIENTO GENERAL

Una vez realizado el modelo informático con las simplificaciones correspondientes y con las cargas aplicadas, se procede a obtener los resultados mediante el programa informático Architrave[®]. Con esta aplicación informática obtenemos los valores de las tensiones, de los momentos flectores, axiles y cortantes, así como la deformación que se producirá en la estructura.

En la imagen 4.1 se muestra la forma en la que deformará la estructura, distinguiendo cuales serán los puntos de mayor deformación. Se observa como los elementos estructurales superiores (forjado superior, cubierta y vigas superiores) deformarán más que las zonas inferiores de la estructura. Esto se debe fundamentalmente a que las luces y distancias son mayores.

Se observa también, mediante la representación de la deformada, cual es el funcionamiento de la estructura. Se distingue claramente como el forjado superior cuelga del extremo de las vigas superiores, estirándolas hacia abajo. También podemos deducir el funcionamiento de cada una de las vigas gracias a la deformada mostrada en la imagen inferior. Vemos como las vigas superiores funcionan como vigas apoyadas en dos soportes, y con voladizos en los dos extremos, mientras que las vigas inferiores funcionan como un voladizo empotrado en el cilindro central.

Conviene destacar la importancia del encuentro central de las vigas superiores. Este entramado de vigas en forma de estrella proporciona gran estabilidad al conjunto, produciéndose una menor deformación en esta zona, tal y como se aprecia en las imágenes anteriormente comentadas.

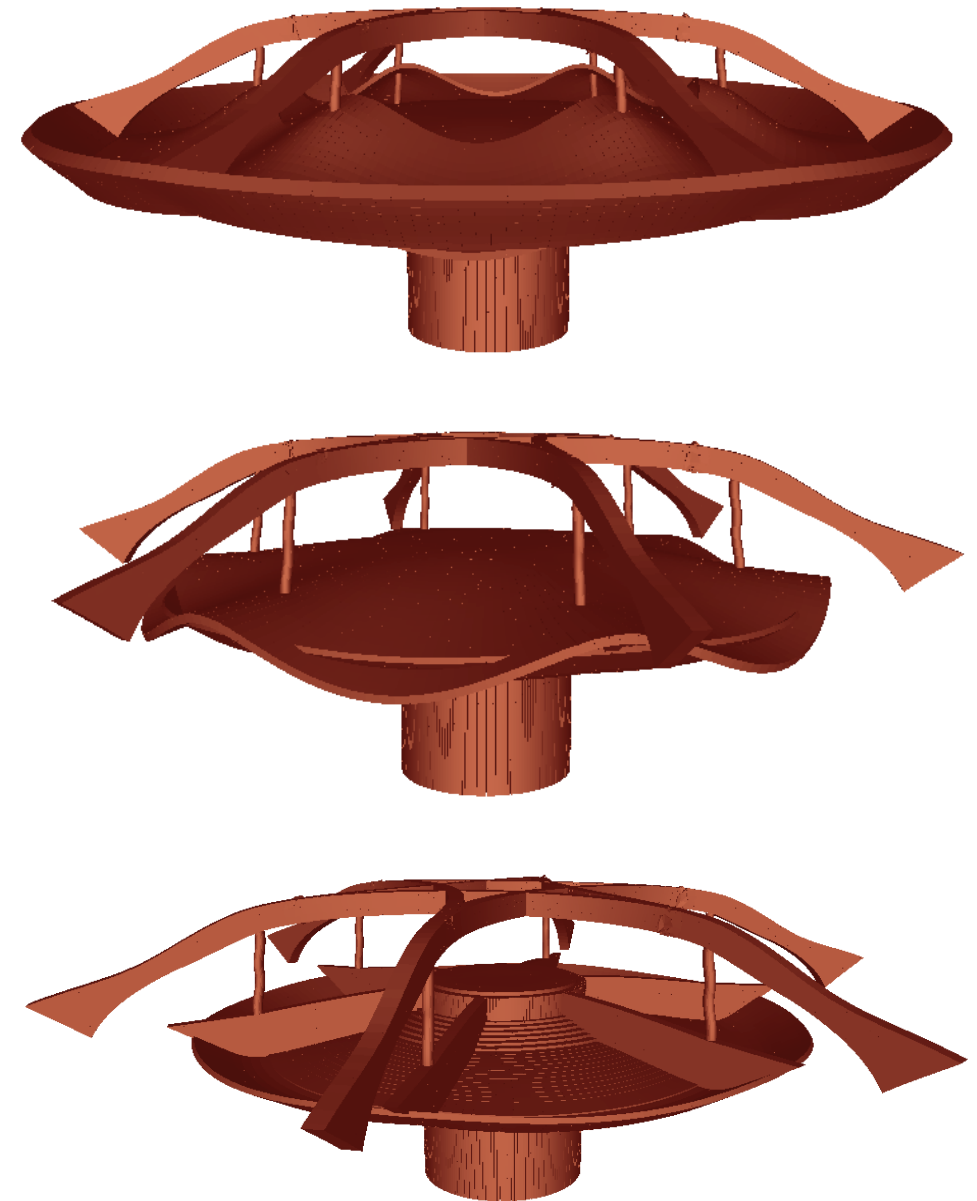


Imagen 4.1 Representación volumetrica de la deformada del MAC. Diferentes elementos mostrados en cada volumetría

En la imagen 4.2 se muestran las tensiones principales de las vigas y del soporte central. Se observa como la gran parte de la estructura trabaja a compresión (tensiones negativas representadas en azul) y que los puntos de tracción más importantes aparecen en las vigas superiores. Como es lógico, también aparecen importantes tensiones de tracción en las vigas inferiores (hasta 8 N/mm^2) pero estas tensiones son mucho menores que las que aparecen en los puntos críticos de las vigas superiores (38 N/mm^2). Por este motivo en el diagrama resaltan más los puntos de las vigas superiores, mostrando con un color más azulado en las vigas inferiores.

Esta gran diferencia de valores entre los diferentes componentes de la estructura imposibilita el análisis general de la misma. Por este motivo, y para entender el funcionamiento global de la estructura, analizaremos de manera aislada cada uno de los elementos que la componen, relacionándolos con las piezas con las que estén directamente vinculadas.

El conjunto de la estructura está formado por 8 elementos estructurales (entre forjados, vigas y soportes). Se analizarán los resultados más importantes y significativos según el elemento estructural que se esté analizando. En los forjados y en la cubierta se estudiarán los momentos, ya que son los que nos permiten conocer los datos necesarios para armar. Las vigas superiores e inferiores y el soporte central son piezas formadas por elementos finitos dispuestos en vertical, de modo que se analizarán las tensiones principales. Los 6 pilares circulares son los únicos elementos modelados como barras, por lo que se analizarán las sollicitaciones más significativas en elementos lineales: axil, cortante y momentos.

En todas las piezas que componen la estructura conviene estudiar también la deformación producida, y su relación con las sollicitaciones actuantes.

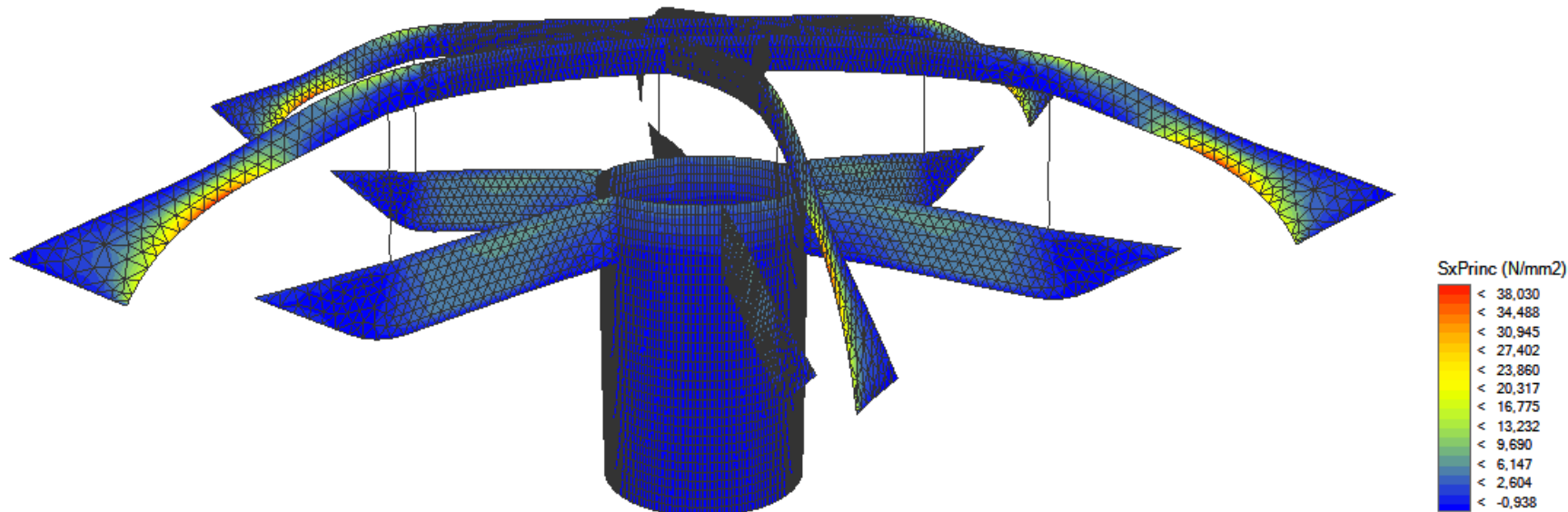


Imagen 4.2 Representación de las tensiones de las vigas del MAC de Niterói según los ejes principales. Tensiones Sx en estados límites últimos

4.2 ANÁLISIS DETALLADO POR ELEMENTOS

FORJADO PRIMERO. (Planta de administración)

En los elementos superficiales como los forjados, el valor que nos interesa conocer es el de los momentos flectores, ya que con estos datos podremos armar la pieza en cuestión.

El forjado analizado, igual que el resto de forjados del edificio, es circular. Teniendo en cuenta la disposición radial de la estructura, analizaremos uno de los 6 sectores que conforman el forjado, extrapolando los resultados y las conclusiones al resto de sectores.

Los valores mostrados en las imágenes 4.3 y 4.4 están referenciados respecto de los ejes cartesianos X (horizontal) e Y (vertical). Teniendo en cuenta esto, observamos que los valores significativos de los momentos para armar se encuentran en unas zonas concretas según estemos analizando los momentos M_x o M_y .

En la imagen 4.3 observamos los valores de los momentos M_x en ELU. Estos valores son representativos en la zona central, marcada en la imagen, y que coincide con el apoyo de las vigas. Estos valores nos sirven para armar esta zona según la dirección horizontal (eje X).

Dentro de este tramo de forjado distinguimos dos partes. En la zona más cercana al encuentro con el cilindro central, los momentos son negativos, con un valor absoluto muy elevado de hasta $-9000 \text{ kN}\cdot\text{m}$. En cambio, cuando nos alejamos parece que los valores de los momentos son constantes en el resto del forjado, debido al color naranja homogéneo en todo el diagrama. No obstante, si analizamos los valores obtenidos observamos que la suposición anterior no es correcta, ya que los valores asignados al color predominante del diagrama varían

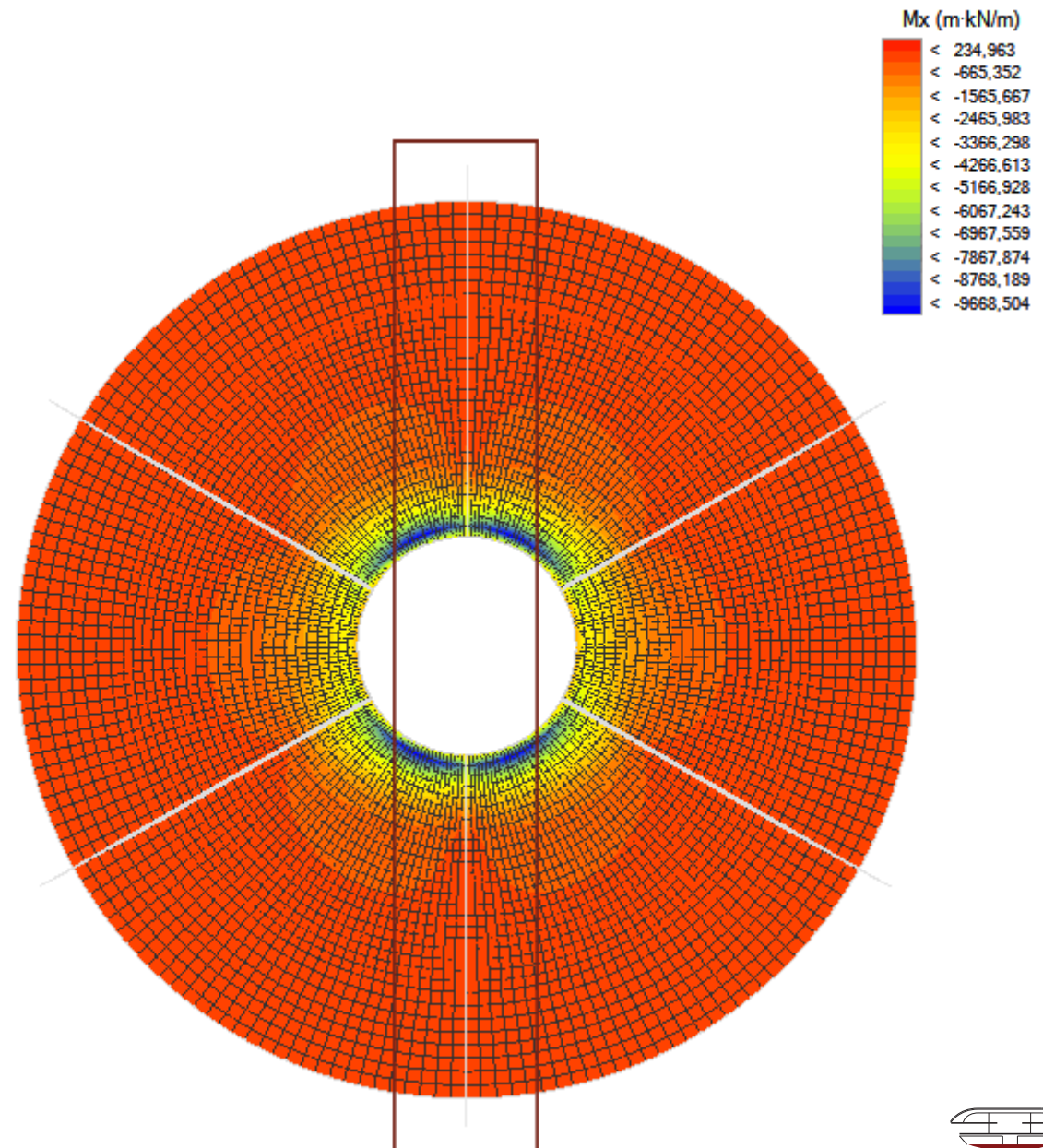
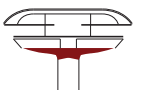


Imagen 4.3 Diagrama de momentos M_x en ELU



entre $235 \text{ kN} \cdot \text{m}$ y $-665 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Este intervalo tan amplio, en el que el momento varía incluso de signo, es incapaz de mostrarnos a simple vista cuales son los momentos reales.

Por este motivo, analizamos independientemente cada uno de los elementos finitos para poder entender cómo funciona realmente el forjado. Observamos que el momento disminuye rápidamente pasando de los $-9000 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el encuentro con el fuste a un máximo positivo de $235 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en la zona central del forjado. Este cambio de signo se debe a la influencia de los soportes superiores que apoyan sobre las vigas. A partir de este punto, los momentos vuelven a disminuir paulatinamente, hasta llegar a los $-87,1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el extremo del forjado. En la zona inclinada del forjado, que conforma el cerramiento de la primera planta, los momentos pasan de los $-87,1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el encuentro con el forjado plano, a un momento prácticamente nulo en el extremo (exactamente $1,47 \text{ kN} \cdot \text{m}$).

En conclusión, se puede deducir que el canto variable del forjado analizado contribuye significativamente a que los momentos no varíen excesivamente, y a que estén lo más cercanos posibles al momento nulo. Sí que destaca especialmente el gran momento negativo que se produce en el empotramiento entre el forjado y el apoyo central.

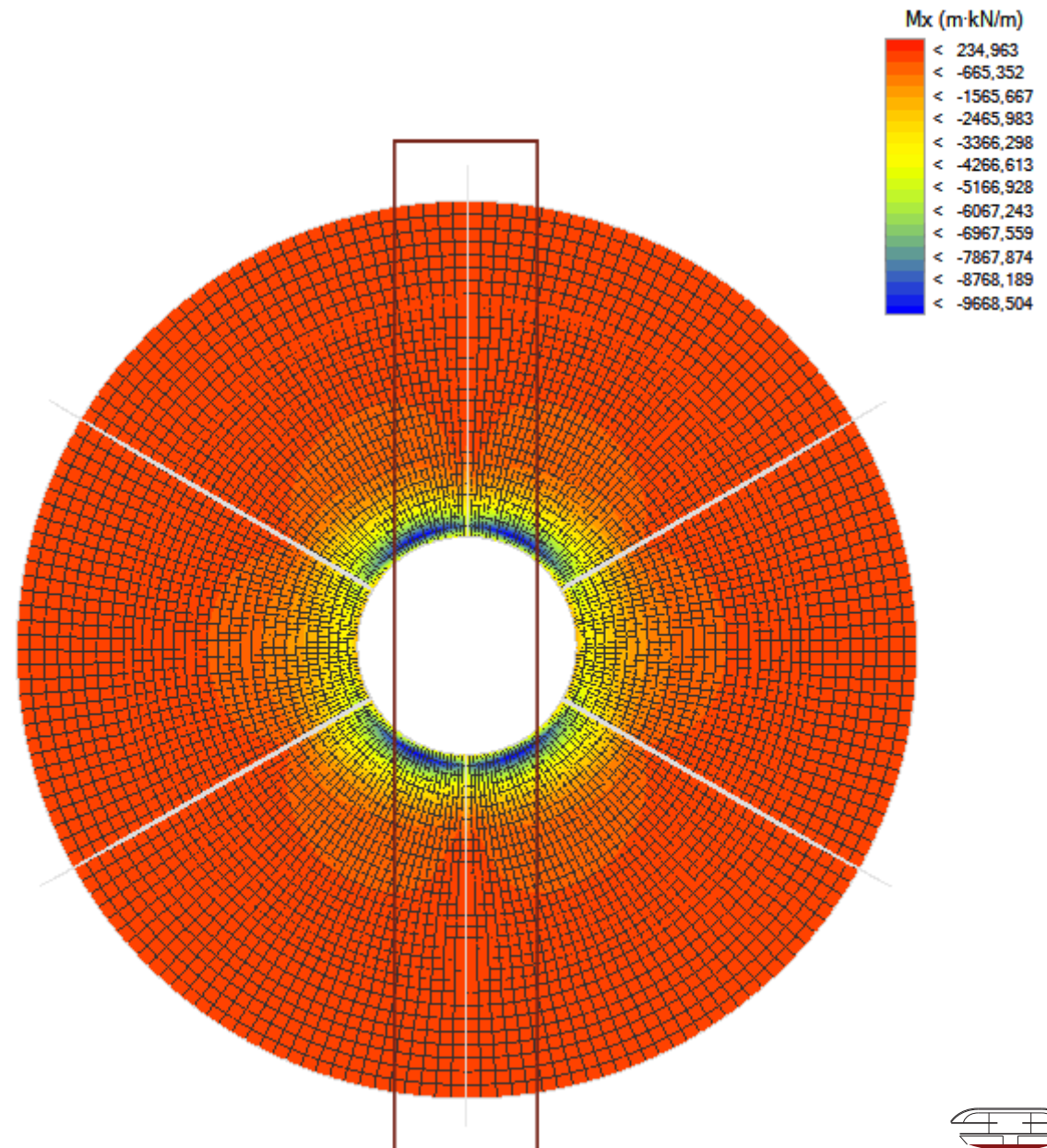
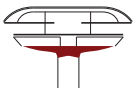


Imagen 4.3 Diagrama de momentos Mx en ELU



En la imagen 4.4 observamos los valores de los momentos M_y en ELU. Estos valores son representativos en la zona situada ente las vigas (centro de vano) y nos sirven para armar según la dirección vertical (eje Y).

Igual que ocurre con los momentos M_x , distinguimos un gran momento negativo en la unión del forjado con el apoyo central. Este momento, de $-11.468 \text{ kN} \cdot \text{m}$ es algo mayor que el que se produce en la zona de las vigas ($-9000 \text{ kN} \cdot \text{m}$). El momento va bajando de manera lineal y gradualmente hasta llegar a un máximo de $127,74 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el extremo del forjado. En la zona analizada anteriormente se producía un punto de inflexión en los momentos debido a la influencia del pilar, sin embargo, en la zona que analizamos ahora no existe la influencia de ningún soporte, por lo que la variación de momentos es gradual.

Al igual que ocurre en el resto del forjado, los momentos disminuyen en la zona oblicua (cerramiento) llegando al momento nulo en el extremo.

En definitiva, podemos concluir que el forjado funciona como un voladizo, en el que existe un momento negativo máximo en el punto de unión, y que va disminuyendo hasta llegar al momento nulo en el extremo. También destaca el papel de la zona oblicua del forjado que actúa como cerramiento. Gracias a este elemento, se rigidiza el canto del "voladizo" haciendo que la estructura trabaje mejor: con unas sollicitaciones menores y unas deformaciones más pequeñas.

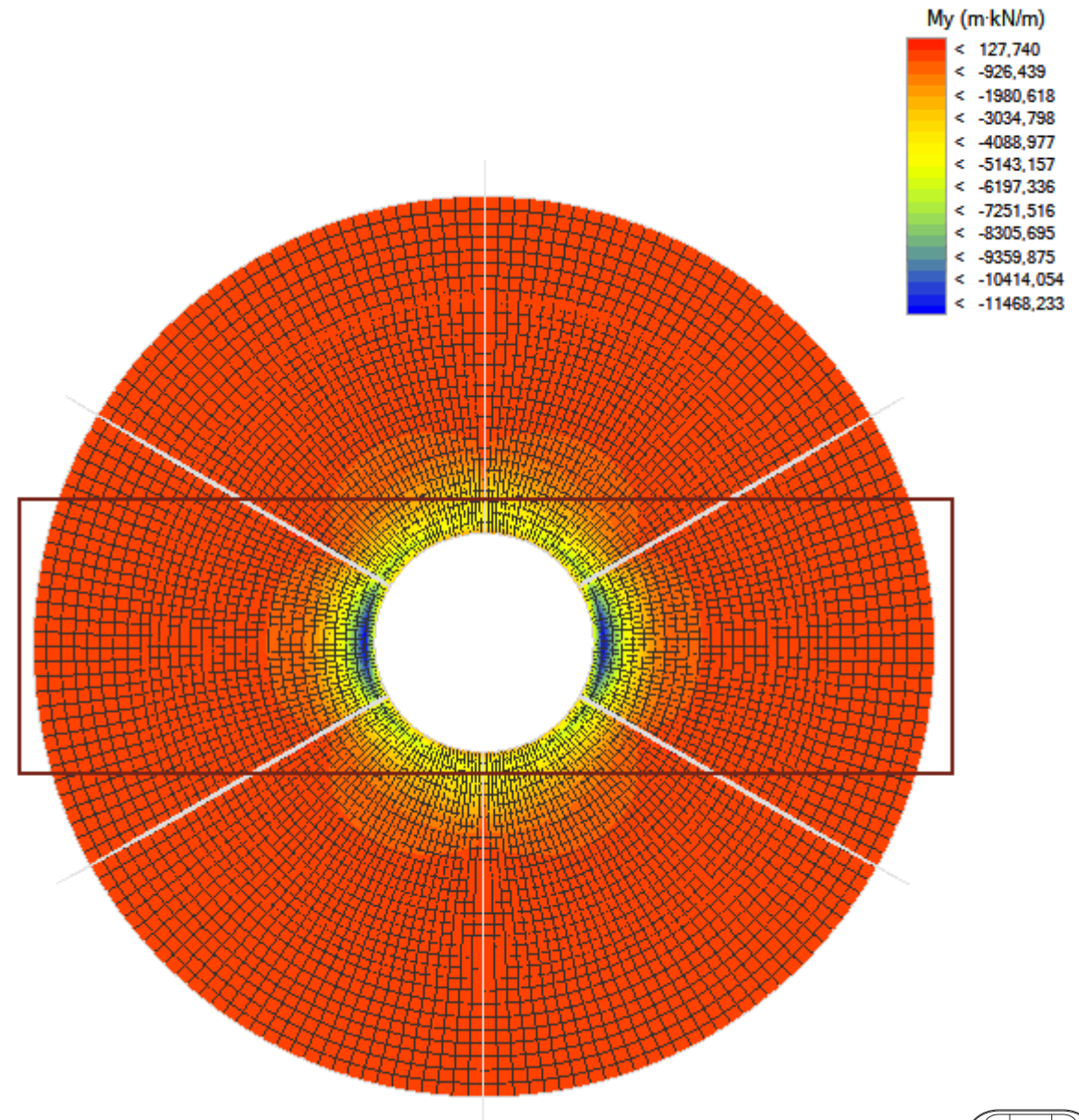


Imagen 4.4 Diagrama de momentos M_y en ELU



DEFORMACIONES

Otro aspecto interesante que deriva del análisis es la deformación del elemento estructural. Teniendo en cuenta que nos encontramos en ELS, en la imagen 4.5 vemos cuales son las deformaciones en cada punto. Se observa, como es lógico, que las deformaciones son mayores cuando nos alejamos del núcleo central, llegando a un máximo de 1,535 cm en los extremos.

Se observa una clara distinción entre la zona horizontal del forjado y la zona oblicua que funciona como cerramiento. En esta última zona, de un espesor menor de 25 cm, las deformaciones son mucho mayores que en el resto del forjado. La máxima deformación de la zona horizontal del forjado es de 1,13 cm, mientras que en la zona oblicua se alcanzan los 1,535 cm comentados anteriormente.

También conviene destacar que en las zonas del forjado más próximas a las vigas pared la deformación es ligeramente menor. Esto se debe a la rigidez que proporcionan las vigas, y se distingue por la forma sutilmente estrellada del diagrama.

En la zona del forjado en contacto con el fuste central la deformación no llega ni a 1 mm (0,096 cm). Además se trata de una deformación de compresión, no de flexión como en el resto del forjado, y que coincide con la deformación del cilindro central en ese punto.

Existen 6 puntos de deformación máxima (1,535 cm), situados en el extremo de la zona situada entre las vigas. Podemos considerar que estas deformaciones máximas son relativamente pequeñas, ya que se trata de un voladizo de más de 9 metros.

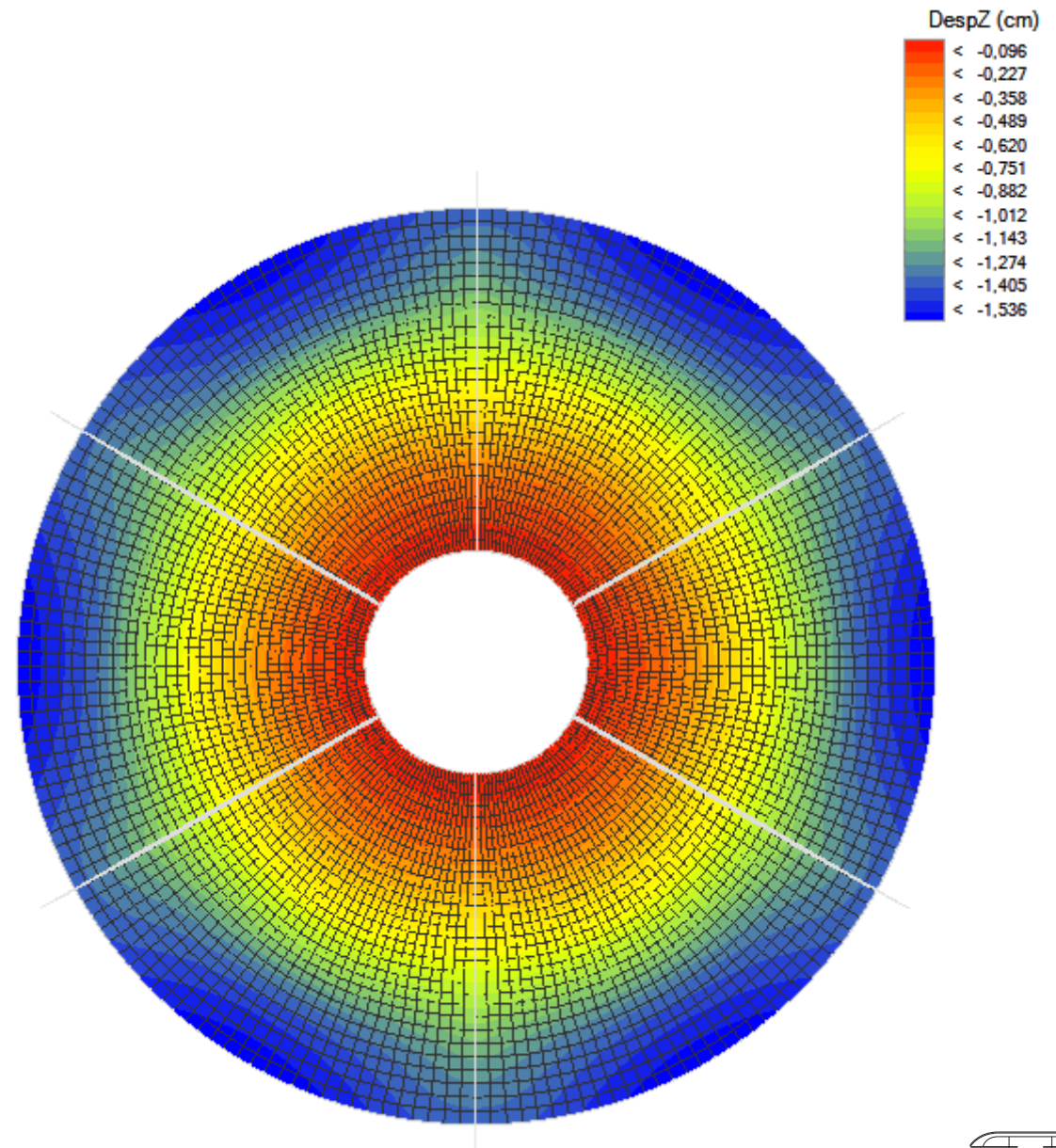
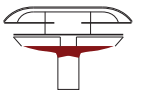


Imagen 4.5 Deformaciones. Diagrama de desplazamiento z en ELS



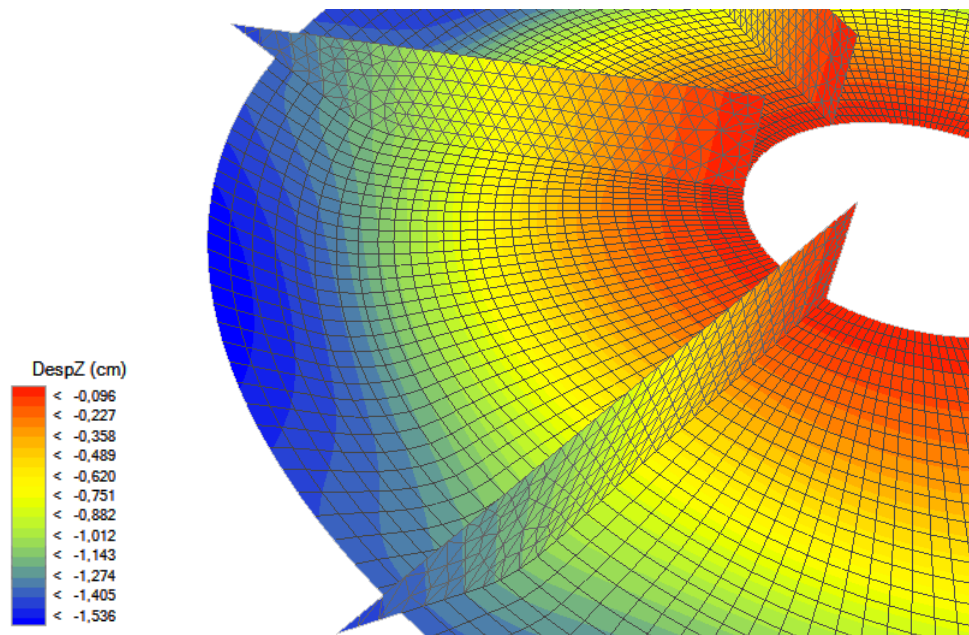


Imagen 4.6 Deformaciones. Detalle del diagrama de desplazamiento z en ELS de uno de los sectores en perspectiva

En la imagen 4.6 vemos el diagrama de uno de los 6 sectores, que forman el edificio. Se muestra la deformación del forjado en relación con las vigas pared, y la influencia de la zona oblicua del forjado que actúa como cerramiento. En esta imagen más detallada vemos cómo a pesar de que la zona de la corona tiene las mayores deformaciones, en realidad la deformación diferencial es ligeramente menor. En la zona horizontal del forjado la variación del desplazamiento vertical en los 9 metros de radio es de 1,1 cm (1,213 – 0,1) mientras que en la zona oblicua, que tiene una longitud de 3,5 metros, la diferencia de desplazamiento entre los puntos más alejados es de 0,32 cm (1,53 – 1,213)

$$0,32 / 3,5 = 0,09$$

$$0,09 < 0,122$$

$$1,1 / 9 = 0,122$$

En las siguientes volumetrías (imagen 4.7) se muestra la deformación global del primer forjado en relación con la posición inicial. Se confirma lo comentado anteriormente, y nos ofrece una representación mucho más visual de cómo se deformará la estructura.

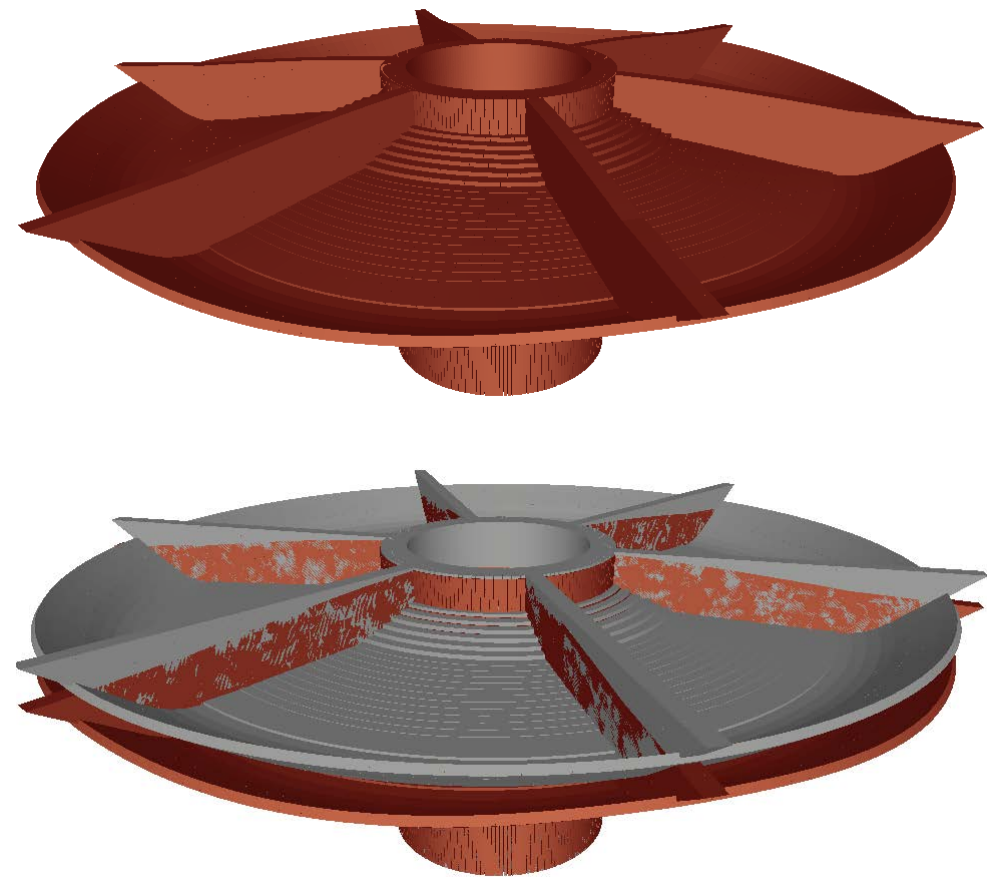
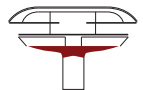


Imagen 4.7 Arriba: deformada del primer forjado. Abajo: deformación en relación con la indeformada



VIGAS INFERIORES. (Planta de administración)

Las vigas inferiores, de casi 3 metros de canto, son las encargadas de recibir todo el peso de la estructura a través de los pilares y transmitirlo al fuste central.

En el análisis de estas piezas nos fijaremos en las tensiones que se producen en cada elemento finito. Estamos analizando unas piezas geoméricamente irregulares dentro de una estructura radial, por lo que se estudiarán las tensiones en las direcciones principales. De este modo nos aproximamos más al comportamiento real que si obtenemos los resultados referenciados a los ejes globales de la estructura. Concretamente analizaremos el eje S_x , ya que es el que va en la dirección longitudinal de la viga.

En la imagen 4.8 vemos que en algunas zonas de las vigas las tensiones alcanzan un valor máximo a tracción de $8,077 \text{ N/mm}^2$. A pesar de que son unos valores elevados, veremos como estas tensiones son bastante más pequeñas que las de las vigas superiores del edificio. La mayor parte de la viga se encuentra traccionada, por lo que hará falta armadura de tracción en toda la viga que contrarreste estos esfuerzos.

En general, las tensiones de tracción se sitúan en la parte superior de la viga, mientras que en la parte inferior una estrecha línea azul nos indica que se producen compresiones. Estas pequeñas tensiones de compresión que no llegan a -1 N/mm^2 ($-0,931 \text{ N/mm}^2$) son fácilmente asumibles por el hormigón sin necesidad de añadir armadura de compresión. Se observa como en el punto de arranque del pilar se produce un cambio brusco en el valor de las tensiones, pasando de las tensiones de tracción de alrededor de 7 N/mm^2 a tensiones nulas, de 0 N/mm^2 en una gran parte de la pieza (toda la zona azul del extremo de la viga).

Además del apoyo del pilar, otro factor que contribuye a que en el extremo de la viga las tensiones sean nulas es el "zuncho perimetral" que se crea mediante el doblado del forjado. Esta zona inclinada de hormigón rigidiza el forjado a la vez que ata las cabezas de las vigas, consiguiendo que las tensiones sean nulas y por lo tanto no sea necesaria la disposición de armaduras.

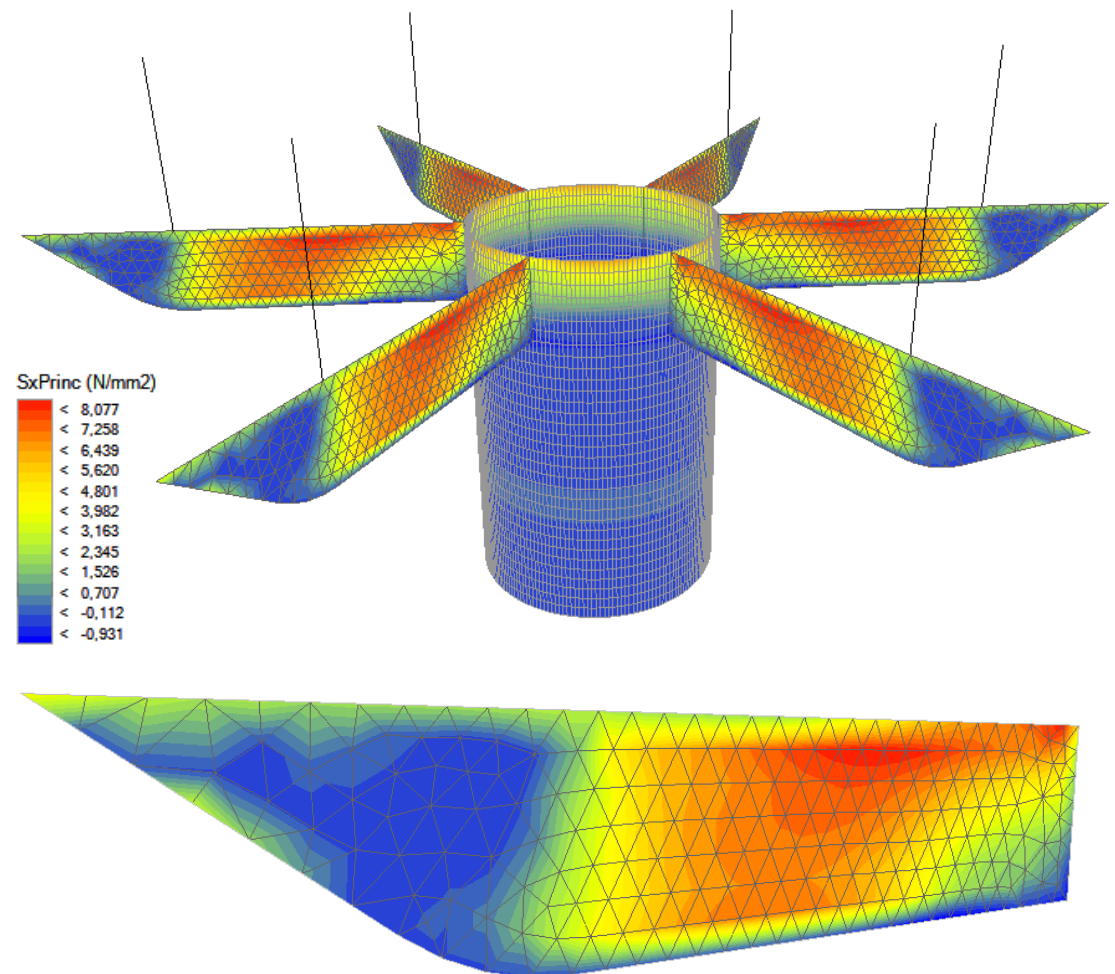


Imagen 4.8 Tensiones S_x principales de las vigas inferiores



Los valores más altos de tensión, tanto de compresión como de tracción, se encuentran en la zona próxima a la unión entre las vigas y el cilindro central. A partir de aquí van disminuyendo hasta llegar a las tensiones nulas que se producen al pasar el pilar, tal y como se ha comentado anteriormente.

Cada elemento finito de los que componen la viga tiene una altura de 40 cm y un espesor de 60 cm. La fuerza que tienen que absorber las armaduras es la tensión máxima de cada elemento finito multiplicada por el área de 240.000 mm². Teniendo en cuenta la tensión máxima de 8,077 N/mm² en la parte superior de la viga, necesitaremos una armadura capaz de resistir $240.000 \times 8,077 = 1.938.480$ N. Suponiendo una armadura pasiva de $f_{yk} = 500$ MPa, harían falta 9 barras de diámetro 25 sólo en los 40 cm superiores de la viga. En la realidad, y debido a la excesiva armadura necesaria para absorber los esfuerzos de tracción, se utiliza armadura postesada (armadura activa). Esta armadura se dimensiona para absorber las tensiones y deformaciones que provocan las cargas permanentes. El momento producido por estas armaduras contrarresta el provocado por las cargas permanentes, por lo que las deformaciones contrarias se igualan y se reduce la fisuración por tracción. Los esfuerzos provocados por las cargas variables son soportados por armadura pasiva adicional.

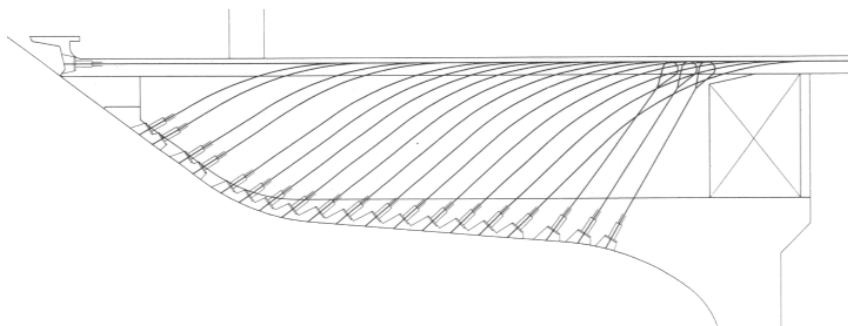


Imagen 4.9 Disposición de las armaduras de postesado de las vigas inferiores

En la imagen 4.9 vemos la disposición real de las armaduras de postesado. Se observa una mayor cantidad de armadura en la zona interior de la viga, y menos en la zona periférica. Esto coincide con los resultados del análisis de tensiones, en el que vemos como en el extremo de la viga las tensiones son prácticamente nulas.

DEFORMACIONES

En cuanto a las deformaciones soportadas por las vigas, comprobamos gracias al diagrama de la imagen 4.10 que los resultados coinciden con las conclusiones obtenidas en el estudio de tensiones. Se puede distinguir claramente el punto de inflexión generado por el apoyo del pilar, que a su vez provoca el cambio de tensiones. Se percibe también como el "zuncho perimetral" que ata las cabezas de las vigas hace que la deformación sea relativamente menor en el extremo de la viga, cambiando la pendiente de la deformada. Tal y como cabe esperar, la deformación máxima se produce en el extremo de la viga, ya que ésta funciona como un voladizo. Este valor es de 1,41 cm para estados límites de servicio (ELS). El valor máximo de 1,535 que se ve en la leyenda corresponde a la deformación máxima del forjado.

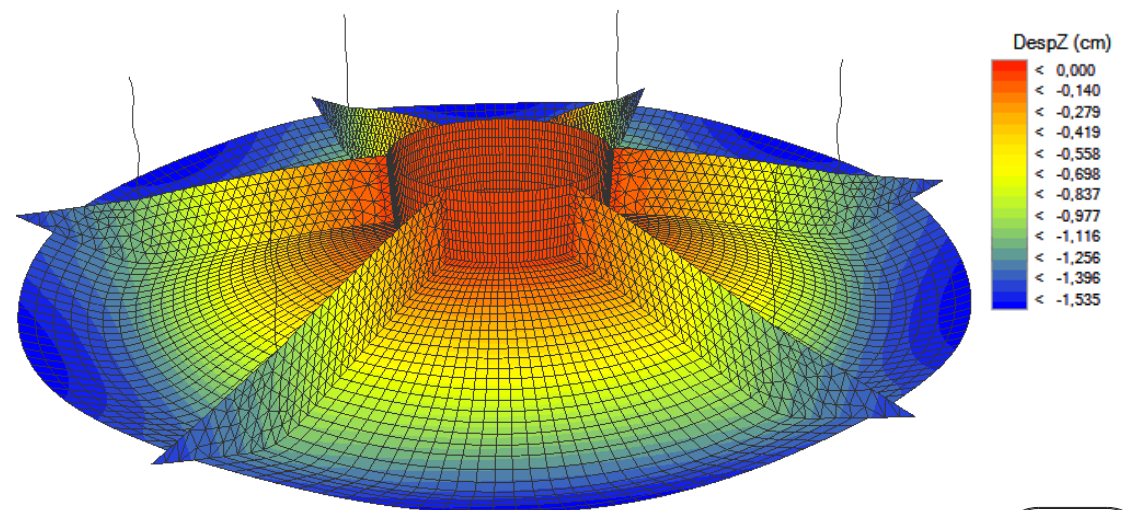


Imagen 4.10 Deformaciones de las vigas inferiores. Diagrama de desplazamiento z en ELS

En la imagen 4.11 se muestra una representación volumétrica de cómo deformaran las vigas analizadas. Se observa la influencia del pilar en la deformación de las vigas, cambiando de una curva convexa a una cóncava.

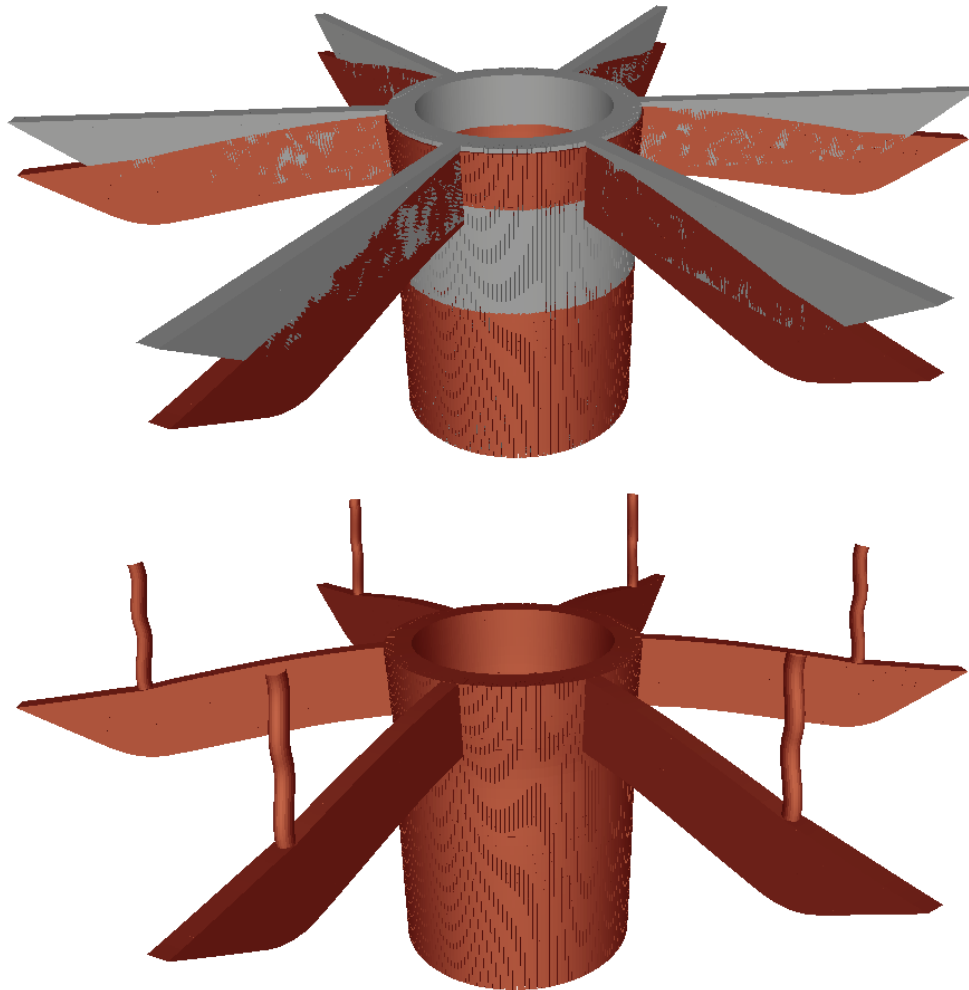


Imagen 4.11 Representación volumétrica de la deformación de las vigas inferiores. Arriba comparación con la indeformada

Como era de esperar, existe una estrecha relación entre las deformaciones producidas en las vigas y los resultados obtenidos en el análisis de las tensiones. En la imagen 4.12 se muestra esta relación marcando los valores de las tensiones S_x sobre la deformada. Vemos como la presencia del pilar genera un punto de inflexión tanto para las deformaciones (curva convexa - cóncava) como para las tensiones (rojo - azul). Vemos también la correspondencia entre la deformación y el signo de las tensiones, es decir, tracción o compresión de la pieza.

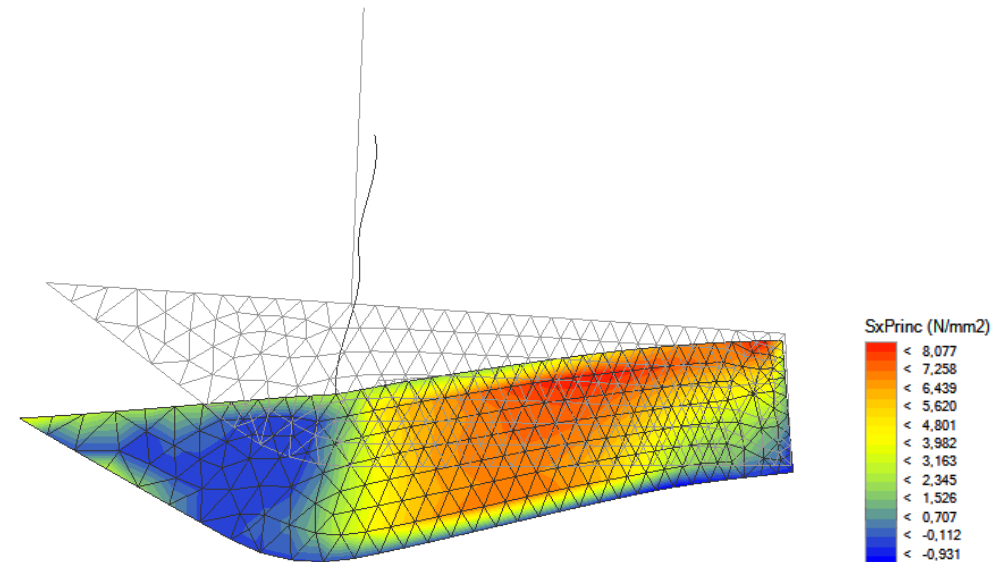


Imagen 4.12 Mapa de tensiones principales representado sobre la deformada de las vigas inferiores



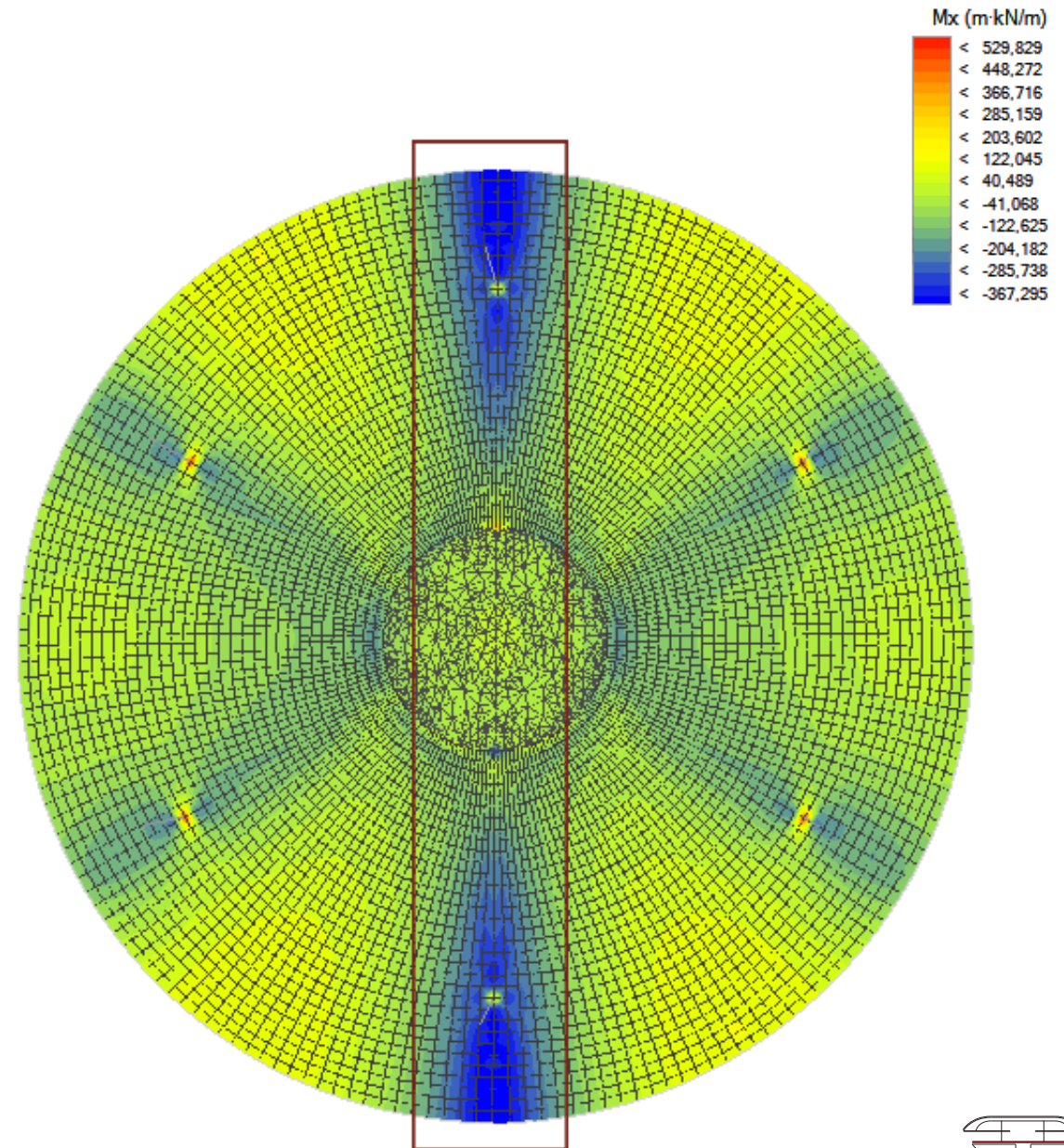
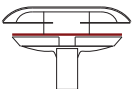
FORJADO SEGUNDO. (Sala de exposiciones principal)

Al igual que con el forjado primero, en este caso los valores que nos interesa conocer son los momentos flectores, tanto en la dirección X (horizontal) como en la dirección Y (vertical). Como se ha explicado anteriormente, los valores significativos para armar en la zona del forjado que apoya sobre las vigas son los momentos M_x . Los valores de los momentos M_y nos servirán para armar la zona situada entre las vigas.

En la imagen 4.13 observamos los valores del momento flector M_x en estados límites últimos. De este gráfico nos interesa la zona marcada, que es la que se encuentra apoyada sobre las vigas y sigue por lo tanto la dirección de los ejes X e Y globales. Analizaremos uno de los tramos del forjado que apoya sobre una viga, extrapolando los resultados al resto de sectores.

Tal y como se muestra en la imagen 4.13, los momentos negativos máximos se producen en la línea en la que el forjado se encuentra con la viga inferior, disminuyendo al alejarnos de esta zona. Dentro de este eje de máximos momentos, el valor más elevado ($-3876,664 \text{ kN} \cdot \text{m}$) se encuentra en la parte externa. En el perímetro exterior los momentos son mayores debido a que el canto de la viga inferior que lo sustenta disminuye.

En el tramo entre el apoyo del pilar y el centro del forjado, el momento va disminuyendo al aproximarse al encuentro con el cilindro central, llegando incluso a cambiar de signo ($+ 40,715 \text{ kN} \cdot \text{m}$). Sin embargo en el punto exacto de empotramiento el momento vuelve a ser negativo, alcanzando los $-312,6 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

Imagen 4.13 Diagrama de momentos M_x en ELU

En el punto donde el pilar apoya sobre la viga inferior aparece una concentración de esfuerzos en la que observamos un momento positivo máximo de $169,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$. En definitiva, podemos entender que en la zona del forjado que apoya sobre la viga los momentos son negativos, aumentando al alejarnos del centro. Sin embargo hay dos puntos singulares que son el empotramiento con el cilindro central, donde vuelve a haber un momento máximo negativo, y el apoyo del pilar donde se crea un máximo positivo.

El diagrama de la imagen 4.14 nos muestra los valores del momento flector M_y en ELU. Con estos valores podremos armar la zona situada entre las vigas, el "centro de vano" marcado en la imagen.

Observamos que en esta zona el forjado actúa como una placa biempotrada que tiene momentos negativos máximos en los extremos (empotramiento del forjado con la viga inferior) y momentos positivos máximos en centro de vano.

El momento máximo positivo, situado en el perímetro de la zona marcada, es de $154,93 \text{ kN} \cdot \text{m}$. A partir de este punto, el momento va disminuyendo paulatinamente hacia los apoyos en las vigas y hacia el centro del forjado. En el encuentro entre el forjado y el apoyo central existe otro empotramiento, por lo que el momento vuelve a ser negativo ($-143 \text{ kN} \cdot \text{m}$). En definitiva, esta zona del forjado trabaja como apoyada-empotrada sobre tres de sus cuatro caras, produciéndose en el borde libre el mayor momento positivo.

Tanto en el diagrama M_x como en el diagrama M_y vemos como los valores de los momentos en la zona central del forjado (situada sobre el cilindro central) son similares y bastante constantes.

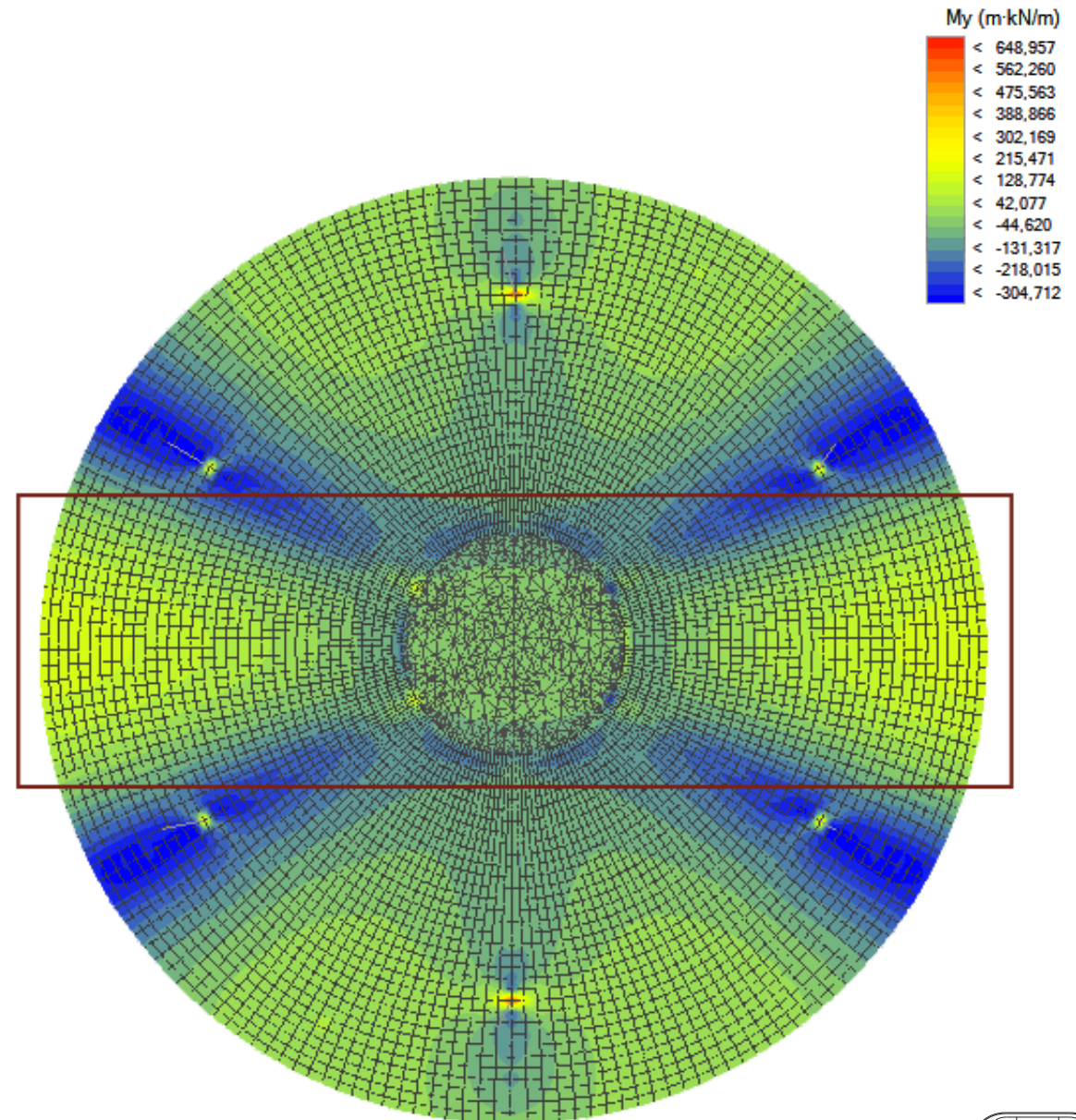
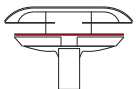


Imagen 4.14 Diagrama de momentos M_y en ELU



Los valores de esta zona varían entre $-142,4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en la zona de contacto con el cilindro central, y $+10,07 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el centro del forjado. El momento negativo del empotramiento baja bruscamente de valor dejando un momento en la mayoría de la zona central de entre -10 y $10 \text{ kN} \cdot \text{m}$. El hecho de que los valores sean iguales según el eje X y según el eje Y se debe a que en esta zona ya no afecta la presencia de las vigas. No obstante, en el punto de empotramiento viga – cilindro se generan unos picos de momentos negativos que se transmiten al forjado.

Conviene destacar que aunque en los gráficos mostrados haya puntos de mayor momento, estos no son reales ya que tenemos que tener en cuenta los ejes de referencia X e Y. De ese modo, los momentos que nos interesan son los que están dentro de la zona marcada, ya que es la que esta referenciada a los ejes X o Y.

DEFORMACIONES

Gracias a la deformada obtenida mediante el modelo informático (imagen 4.15), podemos conocer mejor el comportamiento de la estructura. Se observa una deformación muy similar a la del primer forjado: una mancha de color amarillo en forma de estrella nos muestra como las zonas que están próximas a las vigas sufren menor deformación que las zonas más alejadas.

A pesar de que el funcionamiento es similar al del primer forjado, las deformaciones son bastante mayores, llegando a un desplazamiento máximo en la zona extrema del centro de vano de $3,429 \text{ cm}$ (más del doble que en el primer forjado) y de $1,44 \text{ cm}$ en el extremo de la viga (prácticamente lo mismo que el primer forjado en centro de vano).

Esto se debe a tres factores. En primer lugar, este forjado tiene mayores dimensiones ($34,6$ metros de diámetro frente a los $26,4$ del primer forjado) por lo que al ser un voladizo de mayor longitud, las deformaciones serán más grandes. Por otra parte, el canto de este forjado es de 40 cm de espesor, mientras que el forjado inferior tiene un canto variable que en la parte más estrecha mide 40 cm y va aumentando hasta llegar a los 3 metros. En consecuencia, en gran parte del forjado inferior el canto es mucho mayor, por lo que se reduce la flecha. El último factor es el zuncho perimetral. En el segundo forjado no existe la parte oblicua del forjado que actúa como cerramiento y da rigidez a la estructura, sino que en su lugar aparece la rasgadura perimetral que ofrece vistas del entorno. No existe por tanto un zuncho de atado tan potente como en el primer forjado, lo cual hace aumentar las deformaciones en el perímetro.

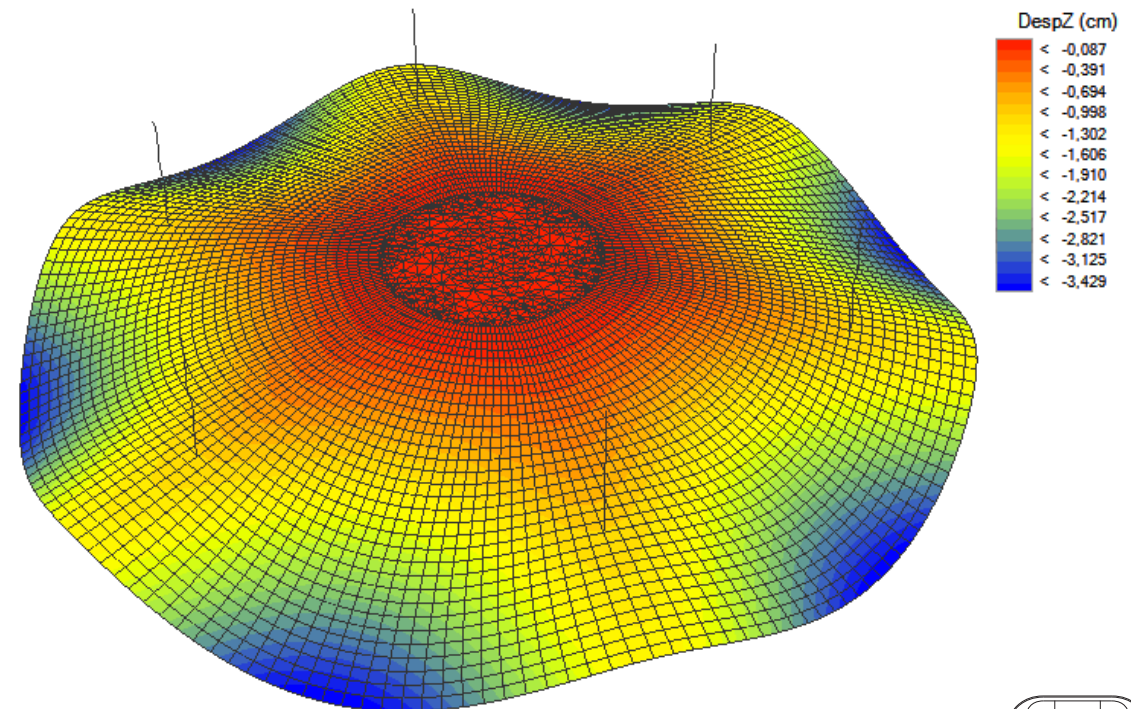
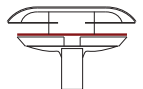


Imagen 4.15 Deformaciones del forjado segundo. Diagrama de desplazamiento z en ELS



Sin embargo hay un punto a favor en el segundo forjado que hace que la deformada no sea excesiva. Se trata de la zona central del forjado, situada sobre el cilindro central. Esta zona hace que el forjado actúe como un vano biempotrado con voladizos a cada lado, mientras que el primer forjado funciona como una única ménsula. Este funcionamiento estructural hace que se contrarresten las deformaciones en los extremos volados con las del centro del vano. Con esta continuidad en el forjado se consigue que tanto la deformación de la parte del voladizo como la del centro del vano se reduzca considerablemente. La deformación en el centro del forjado es de menos de 1 mm (0,093 cm) lo cual es un gran logro teniendo en cuenta que la luz entre las caras del cilindro es de 8 metros.

En las siguientes imágenes (imágenes 4.16 y 4.17) se observa la deformación que tendrá el segundo forjado y la relación con las vigas que lo sustentan. Se ve como la deformación en la parte del forjado que apoya sobre la viga es notablemente menor que en el punto intermedio entre dos vigas. Se muestra también la relación entre la posición inicial del forjado (indeformada) y la deformación final.

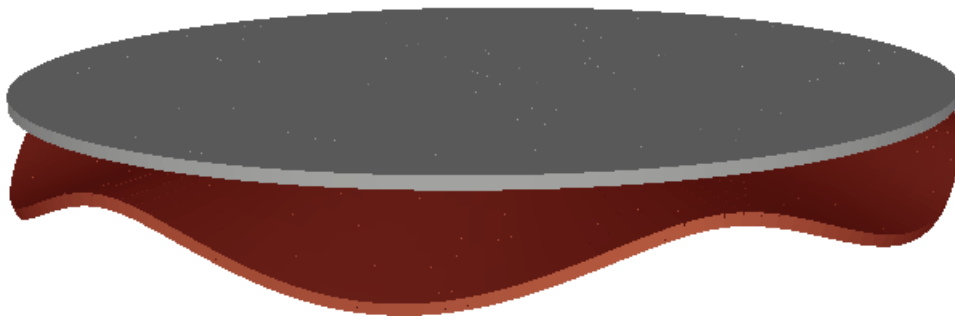


Imagen 4.16 Relación entre la posición inicial (gris) y la deformada (rojo) del segundo forjado

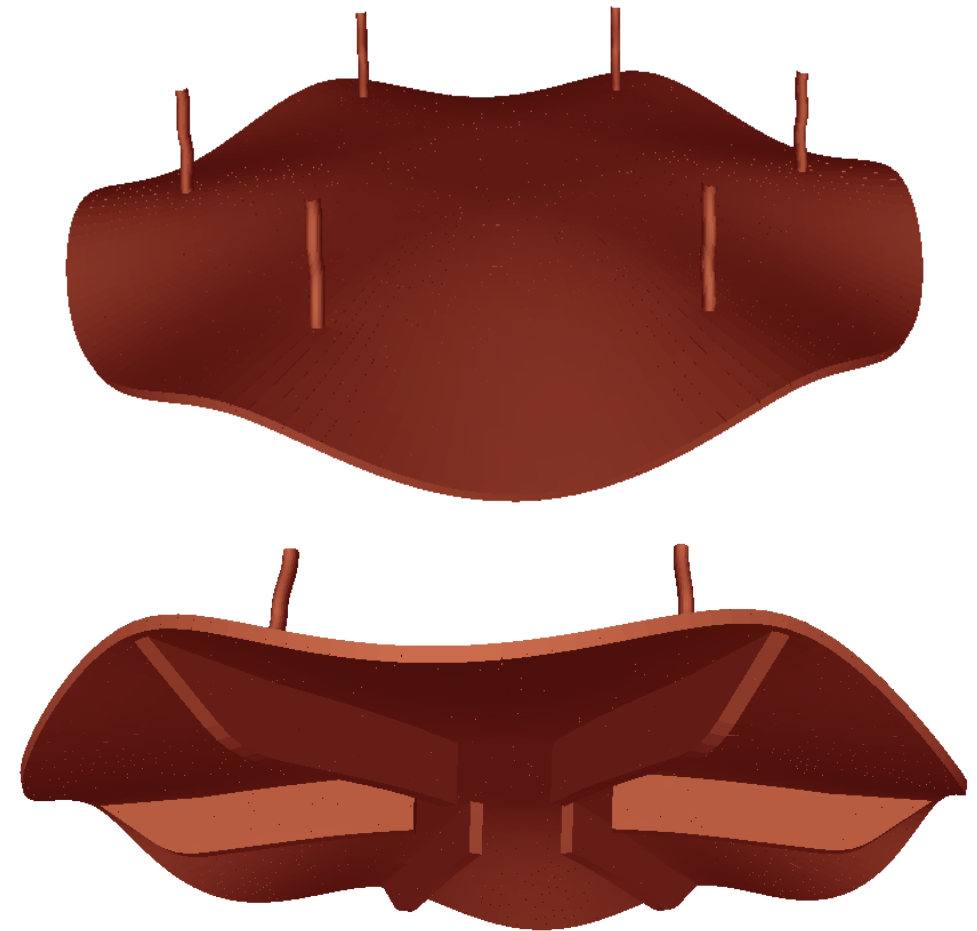


Imagen 4.17 Representación volumétrica de las deformaciones del forjado segundo

SOPORTES CIRCULARES

Los 6 soportes circulares que apoyan sobre las 6 vigas inferiores son los únicos elementos modelados como barras y no como elementos finitos. Como barras que son, los diagramas obtenidos son lineales, y no superficiales como ocurre en el resto de elementos de la estructura del MAC. Debido a la forma regular de la estructura, los 6 soportes tienen las mismas solicitaciones y deforman exactamente igual, por lo que se analizará un único pilar y los resultados se extrapolaran a los otros 5.

AXILES

Como se ha comentado anteriormente, los 6 pilares deben transmitir todo el peso de las dos plantas superiores, de la cubierta, y del gran cuadro de vigas superior. Toda esta estructura de hormigón armado tiene un gran peso, por lo que los axiles que debe de transmitir cada pilar son muy elevados, llegando a un máximo de 8960,518 kN.

En el diagrama de axiles de la imagen 4.18 vemos un escalón a mitad del pilar. Esto se debe a que la parte superior del pilar no tiene que soportar el peso del tercer forjado, sino que este recae enteramente sobre la mitad inferior del pilar. La diferencia de axiles entre los pilares inferiores y los superiores es de aproximadamente 1650 kN, que es lo correspondiente a una sexta parte del peso del tercer forjado.

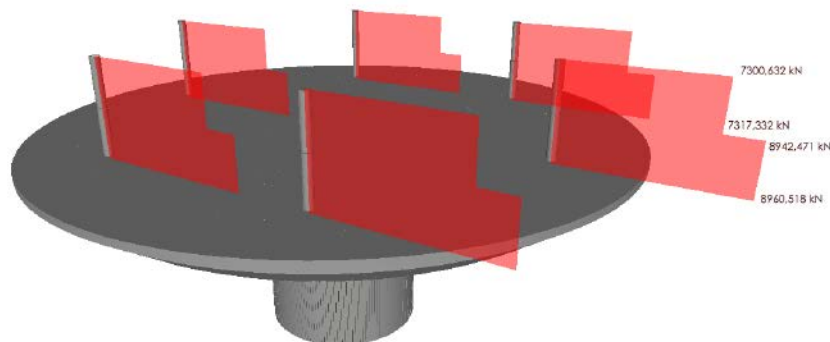


Imagen 4.18 Solicitaciones de los pilares. Axil

CORTANTES

Los pilares tienen solicitación a cortante sólo en la dirección de la viga que sustentan, es decir, en dirección radial. El cortante en la dirección perpendicular es nulo ya que no se han tenido en cuenta los esfuerzos del viento ni los del sismo.

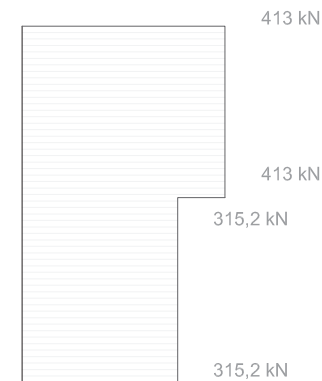


Diagrama de cortante de uno de los pilares (pilar de referencia)

El cortante es constante a lo largo de cada uno de los pilares (superior e inferior). Existe un salto en el diagrama, tal y como se observa en la imagen 4.19, debido a la presencia del forjado tercero. El valor del cortante en el pilar superior es de 413 kN mientras que en el pilar inferior es de 315,2 kN.

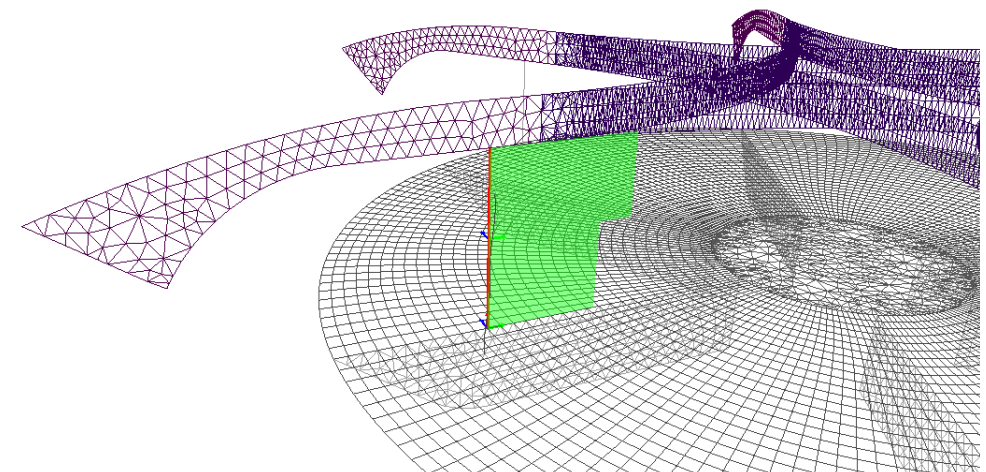


Imagen 4.19 Solicitaciones de los pilares. Cortante

MOMENTOS FLECTORES

Al igual que ocurre con el cortante, los momentos solicitación solo afectan en la dirección radial del edificio, es decir, en la dirección longitudinal de las vigas. En la dirección perpendicular los momentos flectores son nulos.

Tal y como se observa en la imagen 4.20, la forma de los diagramas corresponde con la de un pilar común de una estructura habitual. Lo que sí que difiere notablemente son los valores, ya que en los pilares del MAC de Niterói se alcanzan grandes momentos de hasta $548,85 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

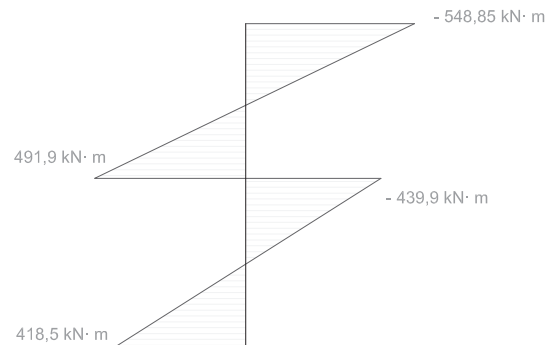


Diagrama de momentos de uno de los pilares (pilar de referencia)

En el diagrama de la izquierda se muestran los valores de cada tramo del pilar. Se distingue como en el pilar inferior los valores son menores que en el tramo superior.

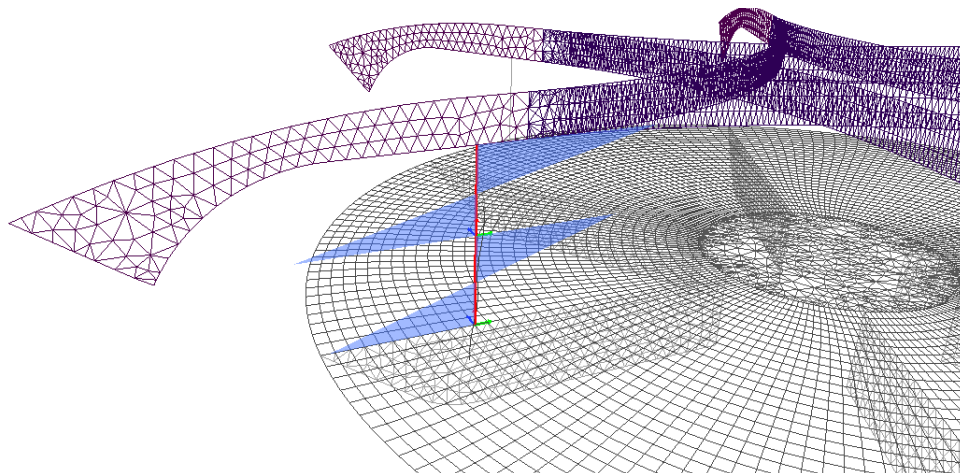


Imagen 4.20 Solicitaciones de los pilares. Momentos flectores

DEFORMADA

Tal y como se observa en la imagen 4.21, los pilares se deforman desplazando la cabeza hacia el interior generando una forma de S. El punto de inflexión en la mitad del pilar se debe a la rigidez que le proporciona el forjado tercero. Conjuntamente a la deformación respecto de la directriz del soporte, también se produce un acortamiento de $0,4 \text{ cm}$ en cada tramo de pilar (inferior y superior) lo que supone un acortamiento total de 8 mm . Además de deformarse, el pilar también se desplaza ya que va unido a las vigas inferiores. El desplazamiento de las vigas inferiores en el punto de apoyo del pilar, y por lo tanto el desplazamiento global del pilar, es de $1,5 \text{ cm}$.

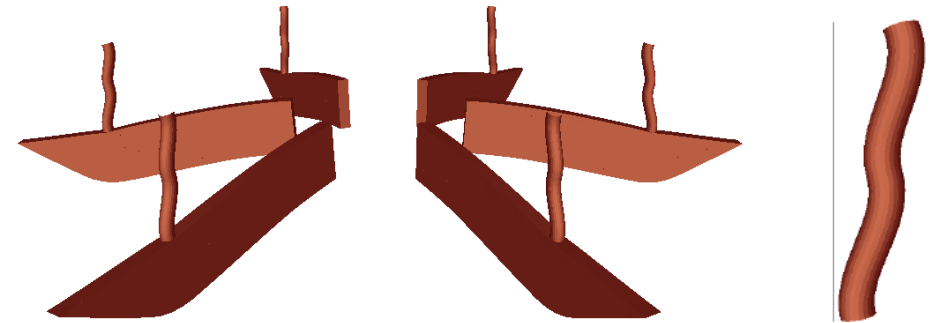


Imagen 4.21 Deformación de los soportes. Izquierda: conjunto de los pilares junto con las vigas sobre las que apoyan. Derecha: Ampliación de uno de los pilares donde se aprecia la deformación en forma de S respecto de la vertical

El forjado intermedio rigidiza los soportes, pudiéndolos entender como dos pilares distintos (superior e inferior). De este modo, cada uno de los soportes tiene una altura más pequeña ($2,72 \text{ m}$) y un gran grosor (65 cm de diámetro) que provoca que la deformación por pandeo sea menor.

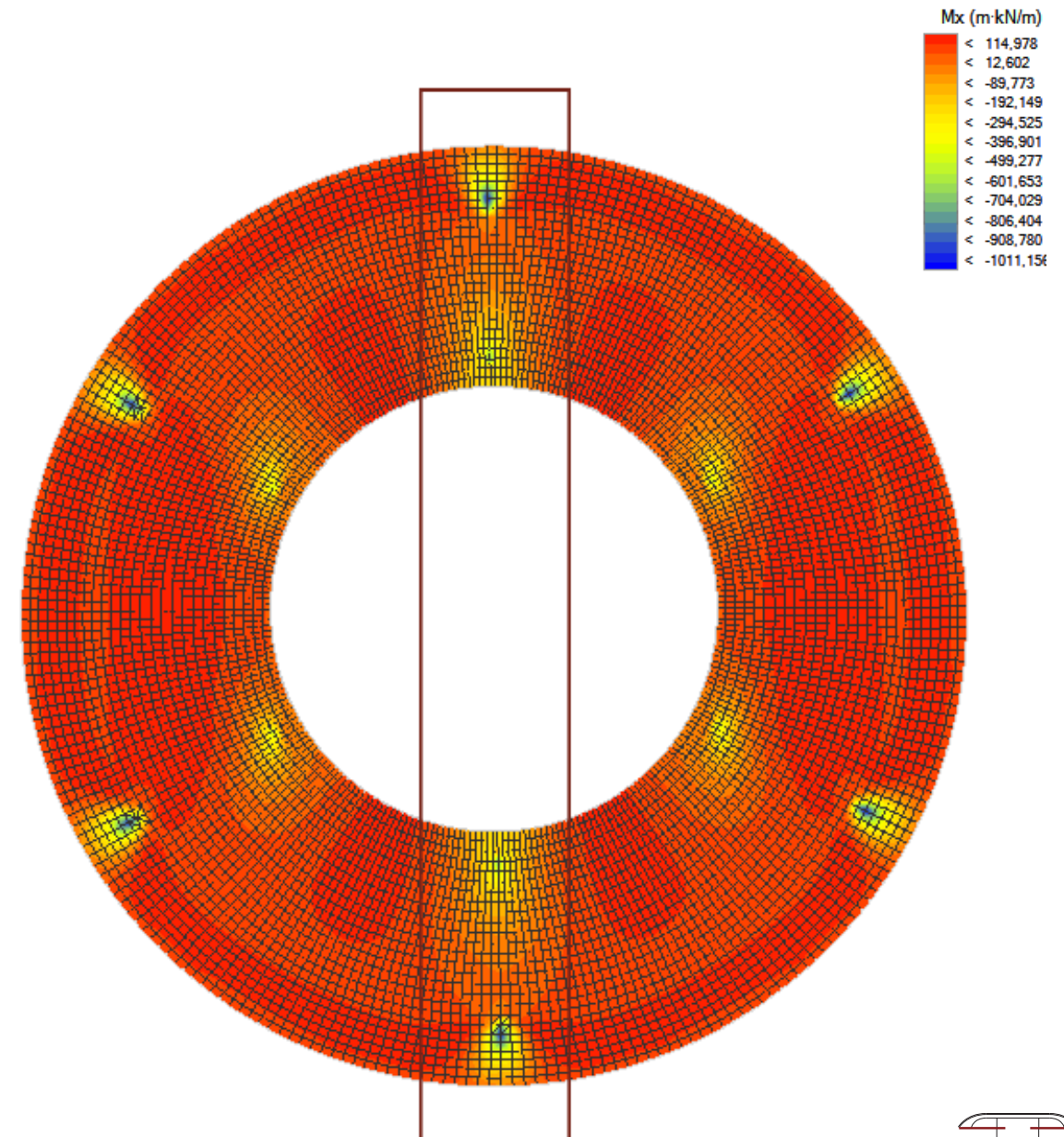
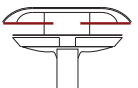
Teniendo en cuenta todas las solicitaciones anteriores, el programa Architrave® nos ofrece una posible solución de armado para estos soportes de 65 cm de diámetro. En los pilares inferiores, la solución obtenida consiste en una armadura perimetral formada por $18 \text{ } \varnothing 32$, y unos estribos de diámetro 12 colocados cada 20 cm . En los superiores, las solicitaciones son menores, por lo que es suficiente con $14 \text{ } \varnothing 32$. No obstante, viendo la escasa diferencia, lo lógico sería armar la totalidad del pilar con la armadura máxima.

FORJADO TERCERO. (Galerías de exposiciones)

Igual que sucede con los forjados ya analizados, los valores que nos interesa conocer son los momentos M_x en la zona de la viga y los momentos M_y en la zona de “centro de vano”, ya que son los valores significativos teniendo en cuenta el sistema de referencia de los ejes X e Y.

En la zona marcada en la imagen 4.22 se analizan los momentos solicitación generados en la zona de la viga. En toda esta franja los momentos son negativos, por lo que la armadura transversal se deberá disponer en la cara superior del forjado. En el primer y segundo forjado, la zona equivalente a la que estamos analizando estaba completamente en contacto con la viga que los sustentaba. En cambio, en este forjado la zona de la viga está sustentada únicamente por dos puntos (el pilar y la cabeza de la viga superior). Esta diferencia se muestra en el diagrama de momentos, apareciendo dos concentraciones de momentos negativos máximos en los puntos de apoyo. El momento va disminuyendo hacia el punto intermedio, llegando a un mínimo de $-31,883 \text{ kN} \cdot \text{m}$. El momento negativo máximo se produce en el encuentro de la cabeza de la viga con el forjado y es de $-977,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$. El otro máximo relativo que se produce en el pilar tiene un momento negativo de $-809,72 \text{ kN} \cdot \text{m}$. En estos puntos de gran momento negativo se deberá disponer también armadura de punzonamiento.

Conviene destacar que de toda la zona de contacto entre la cabeza de la viga superior y el forjado, el punto más crítico donde el momento negativo es máximo se produce en el quiebro del forjado.

Imagen 4.22 Diagrama de momentos M_x en ELU del tercer forjado

En la imagen 4.23 se muestran los momentos M_y que servirán para armar la zona situada entre las vigas. En este tercer forjado existe un gran hueco central que generará la doble altura en la sala principal de exposiciones. Debido a este hueco, cada uno de los 6 sectores que conforman el forjado solo puede estar apoyado por dos de sus 4 caras, a diferencia de lo que ocurre en el forjado 2 explicado anteriormente. Como consecuencia, cada tramo de forjado funciona como bidireccional sobre apoyos puntuales (soportes y extremo de la viga), generándose en la zona de los apoyos una concentración de esfuerzos negativos. Estos momentos van disminuyendo al aproximarse al centro de vano, cambiando de signo y llegando a un momento máximo positivo de $130,647 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

En el borde externo se produce un quiebro en el forjado que formará el cerramiento de esta planta. Esta parte oblicua del forjado actúa como un gran zuncho de atado, igual que sucedía en el forjado primero. Este "zuncho" hace que los momentos disminuyan en esta zona, llegando incluso a generarse momentos negativos de poca intensidad ($-33 \text{ kN} \cdot \text{m}$). En el borde interior no existe ningún tipo de zuncho, por lo que es donde se produce el mayor momento positivo ($130,647 \text{ kN} \cdot \text{m}$)

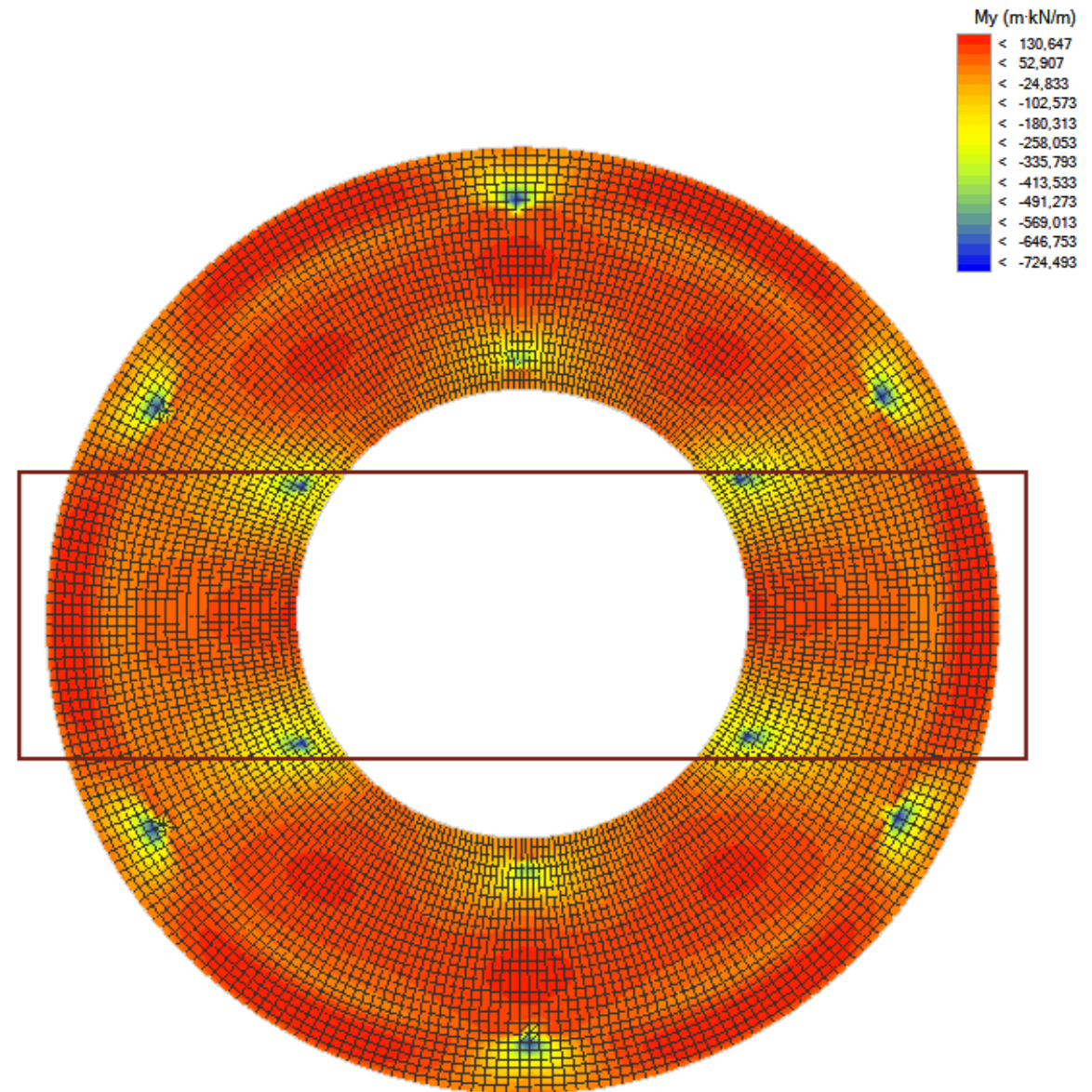
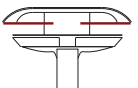


Imagen 4.23 Diagrama de momentos M_y en ELU del tercer forjado



DEFORMACIONES

Al igual que el resto de forjados, y como es lógico, la deformada del forjado tercero presenta una forma de estrella (imagen 4.24). La zona de menor deformación es la más cercana a los pilares, generándose una deformación en el punto de apoyo del pilar de 1,4 cm. Podríamos esperar que en la zona de encuentro con la cabeza de la viga también se produjese poca deformación, ya que es el otro punto de apoyo del forjado. Sin embargo, es uno de los puntos de mayor desplazamiento (4.17 cm). Esto se debe a que la viga superior trabaja como un voladizo con una carga puntual en el extremo, lo cual genera una gran deformación que se transmite al forjado.

El mayor desplazamiento se produce en el centro del vano. Sin embargo, debido a la presencia del zuncho perimetral, no se produce en el extremo como cabría esperar en un voladizo, sino que se produce en la zona central del sector, llegando a alcanzar un desplazamiento máximo de 4,857 cm.

Cabe destacar que el punto de menor deformación no es exactamente el apoyo del pilar, sino que se encuentra en el borde interior del forjado. Esto se debe a que el desplazamiento de las zonas periféricas "levantan" o compensan la deformación producida en la zona interior, haciendo que la deformación mínima (de 0,945 cm) se produzca en este punto.

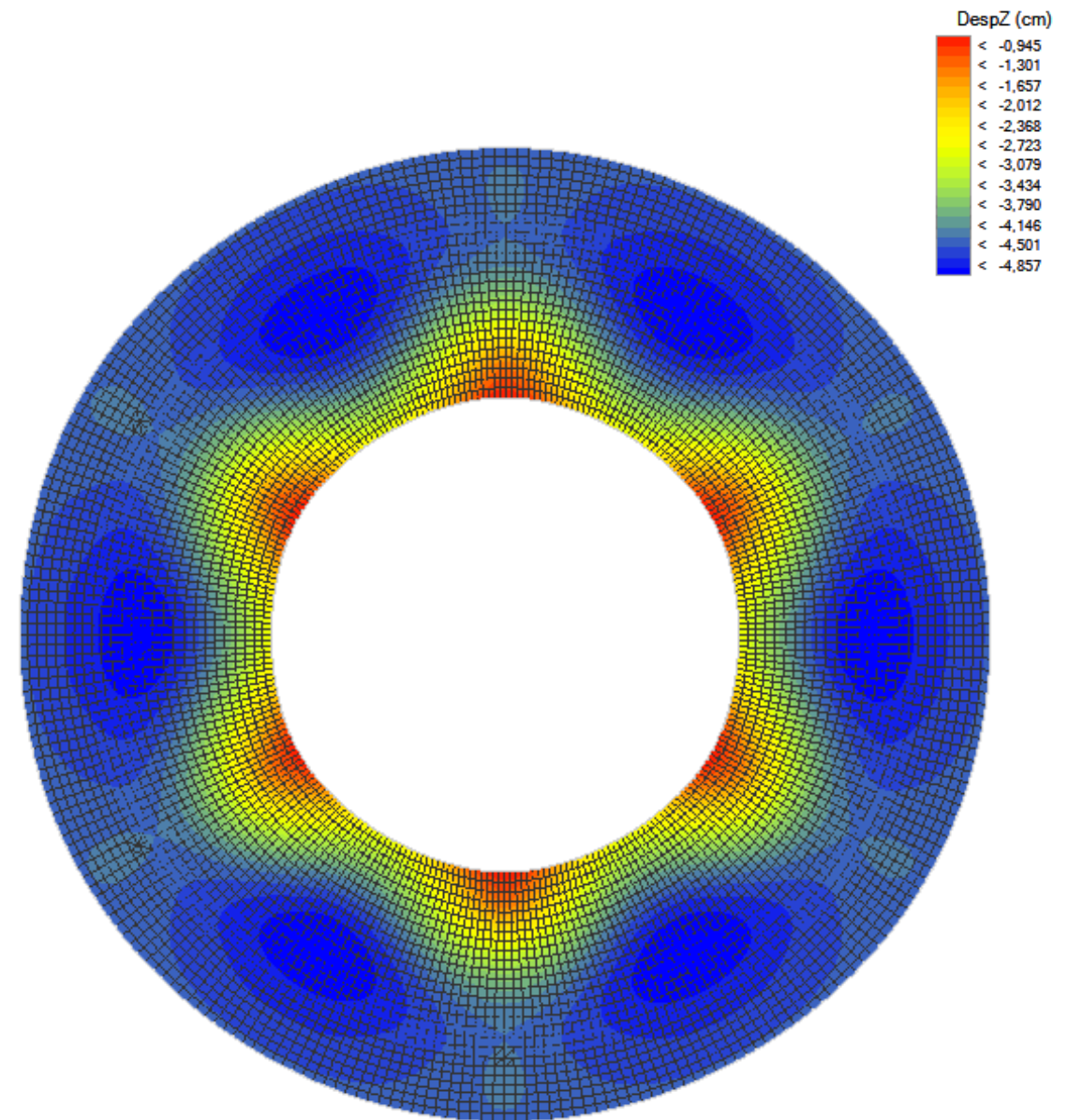
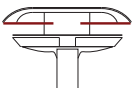


Imagen 4.24 Diagrama de deformaciones del tercer forjado en ELS



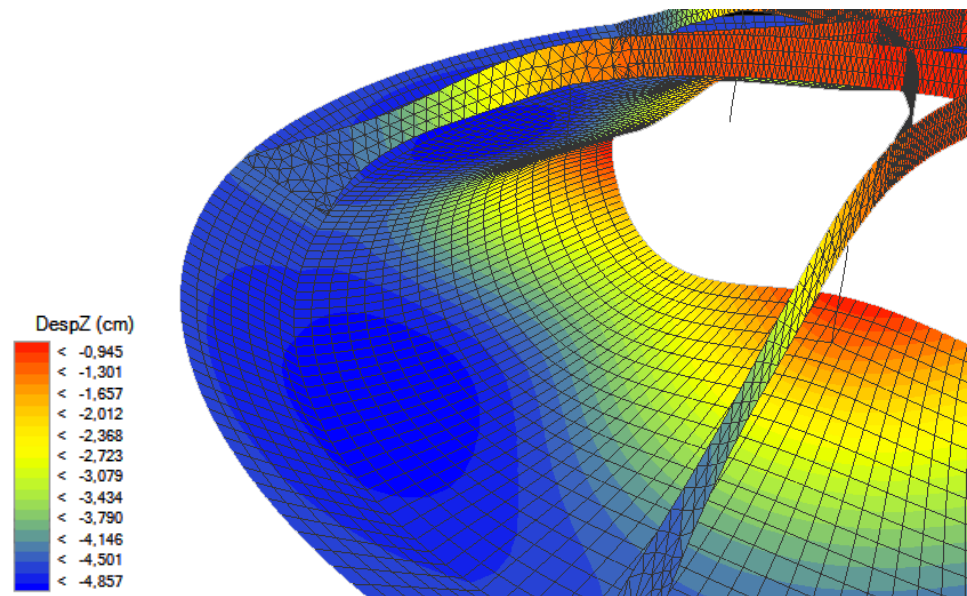


Imagen 4.25 Detalle de deformaciones de uno de los sectores del tercer forjado. Diagrama de deformaciones en ELS

En la imagen 4.25 se muestra los valores de la deformación sobre la propia deformada. Vemos de manera más detallada y visual cuales son los valores de la deformación de uno de los 6 sectores que componen el forjado. Además se establece la relación entre la deformación de las vigas superiores y el propio forjado.

Gracias a la perspectiva se observa de manera más clara los resultados y conclusiones obtenidos anteriormente: la deformación máxima se produce en el centro del vano y la deformación mínima en el borde interior, dentro de la zona de influencia del pilar.

Por último se muestran unas imágenes en volumen sólido que nos ayudan a entender cómo se deformará la estructura. En la parte superior de la imagen 4.26 se muestra la deformada en relación con la posición inicial, mostrándonos cuales son los puntos que más se desplazan.

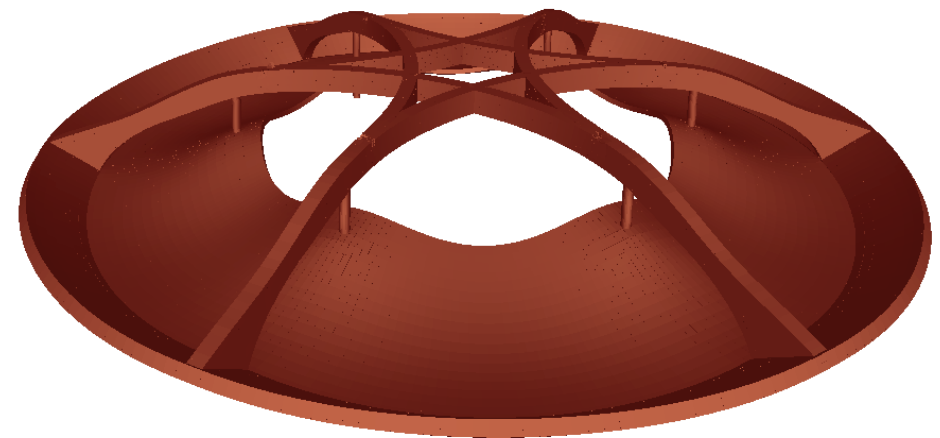
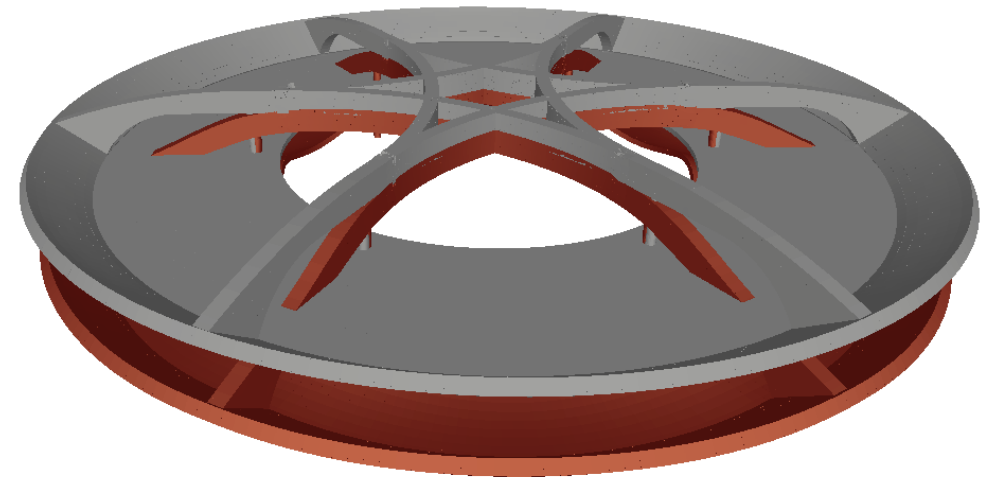
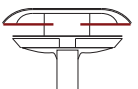


Imagen 4.26 Representación volumétrica de las deformaciones del tercer forjado



VIGAS SUPERIORES. (Cuadro de vigas en forma de estrella)

Uno de los elementos más importantes que forman la estructura del MAC de Niterói son las imponentes vigas superiores que forman una gran estructura estable en forma de estrella. Estas vigas son las encargadas de sostener el peso del forjado tercero y de la cubierta, apoyándose únicamente en 6 soportes cilíndricos.

Para el análisis de estas vigas de gran canto y directriz curva se estudiarán los resultados de las tensiones obtenidas mediante el programa informático Architrave®. Las tensiones referidas a las direcciones principales nos muestran los resultados en los ejes locales de cada elemento finito. Estos datos tienen mayor interés que los que se obtienen según los ejes cartesianos globales de la estructura, ya que son piezas de geometría irregular i directriz curva. El eje Sx es el que va en la directriz de la viga, por lo que analizaremos las tensiones según el eje Sx principal (imagen 4.27).

En el diagrama de momentos de la imagen 4.27 vemos que predomina el color azul, por lo que la mayor parte de las vigas tiene unas tensiones relativamente pequeñas de entre -1 y 2 N/mm². Esto nos demuestra que la mayor parte de la estructura trabaja a compresión o con tensiones de tracción muy pequeñas, lo cual es especialmente adecuado en una estructura de hormigón como esta. Las tensiones de compresión máximas (-0,938 N/mm²) son fácilmente asumibles por el hormigón, sin necesidad de añadir armadura de compresión. Esta tensión máxima de compresión se encuentra en la parte superior del extremo de la viga. Toda la zona central de las vigas (donde se produce el encuentro entre las 6 vigas y se forma la estrella) tiene unas tensiones de tracción relativamente bajas de entre 0 y 3 N/mm² que se pueden absorber simplemente con armadura pasiva.

Sin embargo existen dos puntos especialmente traccionados que se deberán suplementar con una armadura capaz de absorber estos esfuerzos. Estos puntos aparecen en la zona superior del encuentro de la viga con el pilar (Punto A) y en la zona cóncava de la viga (Punto B).

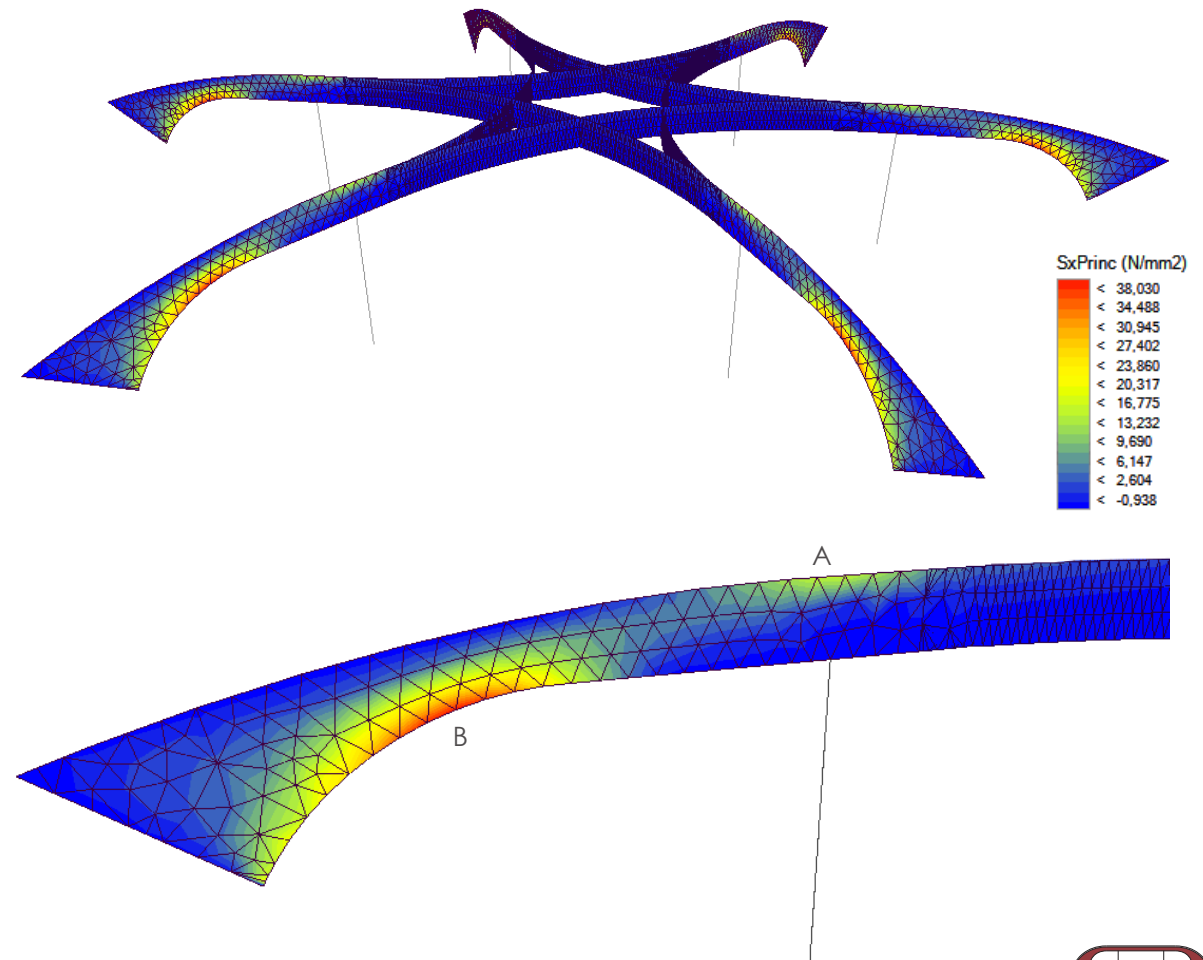
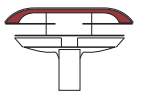


Imagen 4.27 Tensiones Sx principales de las vigas superiores. Arriba conjunto de todas las vigas. Abajo detalle de una de las vigas



En el punto A la tensión máxima es de 16,04 N/mm², y se produce debido a la presencia del pilar. Suponiendo que dividimos el canto de la viga en 6 partes para armar cada una de estas secciones por separado (tal y como se muestra en la imagen 4.28), y teniendo en cuenta que el espesor de la viga es de 750 cm, tenemos secciones de 750 X 210 = 157.500 mm². En la tabla siguiente se muestran los cálculos realizados para obtener una estimación de la armadura necesaria para absorber estos esfuerzos de tracción.

Sección	Tensión máxima σ_{max} (N/mm ²)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Área armadura necesaria (mm ²)	Propuesta de armado
A.1	16,043	157500	2526772,5	5811,61	12 Ø 25
A.2	9,5		1496250	3441,40	7 Ø 25
A.3	2,95		464625	1068,64	3 Ø 25
A.4	1,45		228375	525,27	2 Ø 20
A.5	0		-	-	-
A.6	0		-	-	-

* Se ha supuesto una armadura B-500 cuyo $f_{yd} = 500 / 1,15 = 434,78$ MPa

Tabla 4.1 Cálculo de la armadura de tracción necesaria en el punto A

En el punto B la tensión máxima es mayor que en el punto A, llegando a los 38,03 N/mm². El forjado tercero cuelga de la cabeza de estas vigas por lo que las estira, generando esta tensión de tracción. Haciendo el mismo planteamiento que en el punto B para la estimación de armadura necesaria, obtenemos los siguientes resultados:

Sección	Tensión máxima σ_{max} (N/mm ²)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Área armadura necesaria (mm ²)	Propuesta de armado
B.1	2,75	157500	433125	996,19	4 Ø 20
B.2	6,311		993982,5	2286,17	5 Ø 25
B.3	13,8		2173500	4999,08	11 Ø 25
B.4	21,313		3356797,5	7720,68	10 Ø 32
B.5	29,5		4646250	10686,44	10 Ø 32 + 6 Ø 10
B.6	38,03		5989725	13776,45	10 Ø 40 + 2 Ø 32

* Se ha supuesto una armadura B-500 cuyo $f_{yd} = 500 / 1,15 = 434,78$ MPa

Tabla 4.2 Cálculo de la armadura de tracción necesaria en el punto B

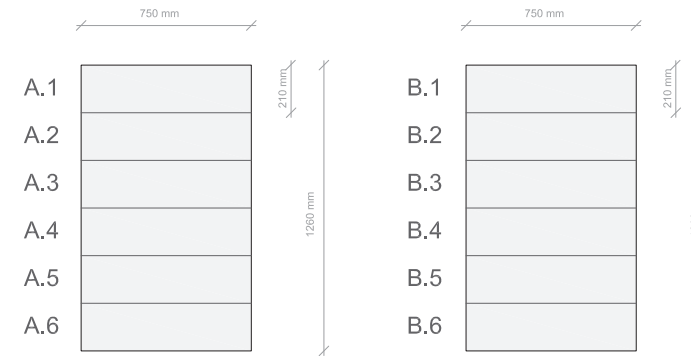
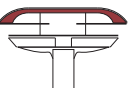


Imagen 4.28 División de la viga en partes más pequeñas para armar

Como vemos en las tablas anteriores, la armadura necesaria es excesiva. En el punto A, aunque cabe en la sección de la viga, la cantidad de armadura pasiva necesaria es muy elevada. Sin embargo en el punto B, donde la tensión es mucho mayor, la armadura necesaria no es admisible ya que es tanta la cantidad que se requiere que no cabe en la viga. La solución sería, tal y como sucede en la realidad, usar armadura postesada.

El funcionamiento de las vigas postesadas in situ, como es el caso de estas vigas, consiste en tesar la armadura activa después del fraguado del hormigón del elemento estructural, cuando éste ha alcanzado una resistencia suficiente para soportar las tensiones provocadas por el acero. El efecto estructural del postesado produce unos esfuerzos contrarios al de las fuerzas gravitatorias, permitiendo la compensación total o parcial de las cargas permanentes. De este modo, la armadura pasiva adicional solo tiene que contrarrestar los esfuerzos producidos por las cargas variables. Las armaduras de postesado se colocan dentro de unas vainas que se replantean para colocarlas en la posición adecuada para absorber los máximos esfuerzos. En el caso de las vigas que estamos analizando, las vainas recorren toda la zona extrema de la viga, absorbiendo tanto los esfuerzos del punto B como del punto A, y reduciendo así la cantidad de armadura necesaria.



DEFORMACIONES

En la imagen 4.29 se muestra la deformación que sufrirán las vigas especificando el valor concreto gracias al diagrama de colores. Se observa como la zona central, el encuentro de las 6 vigas en forma de estrella, es más estable y se deforma menos. En esta zona la deformación varía entre -1,24 y -0,914 cm lo cual significa que la variación relativa es de aproximadamente 0,35 cm.

Cada una de las vigas curvas funciona como una viga biapoyada (apoyo sobre dos pilares no consecutivos) con voladizos en los dos extremos. Según este planteamiento, cabría esperar que las deformaciones máximas se dieran en los extremos de los voladizos y en el centro del vano. Sin embargo, tal y como se ha explicado en el párrafo anterior, en la zona central las deformaciones son mínimas, debido a que en esta zona las 6 vigas trabajan solidariamente como un único elemento estructural en forma de estrella.

Destaca que en el punto intermedio entre los dos apoyos (centro de vano) la deformación es menor que en los apoyos, (0,914 cm en centro de vano frente a los 1,66 cm en el apoyo). Esto significa que en términos relativos de la viga, la deformación en la zona de centro de vano es positiva, es decir hacia arriba. Esto es especialmente relevante en una viga cuya luz es de más de 20 metros. Estos datos nos demuestran la idoneidad de la geometría de la estructura propuesta. Nos muestran como al hacer trabajar conjuntamente a las vigas, la respuesta de la estructura es mucho mejor, confirmándonos que la solución a un problema estructural no es más sección de hormigón y más armado, sino un correcto y adecuado funcionamiento de la estructura.

A mayor distancia del centro, la deformación de las vigas es mayor, ya que cada viga deja de trabajar solidariamente con las demás. El forjado tercero cuelga del extremo del voladizo de la viga, por lo que añade una carga puntual que genera una mayor deformación. El desplazamiento máximo se produce en el extremo del voladizo y es de 4,226 cm. No obstante, existe un desplazamiento solidario en todo el cuadro de vigas de 1,66 cm debido al desplazamiento general de la estructura y al acortamiento de los pilares. Por este motivo lo que nos interesa es el desplazamiento relativo de la viga, ya que es el que nos muestra la flecha real de la pieza. En este caso, la diferencia entre el desplazamiento del punto de apoyo del pilar (1,66 cm) y el del extremo voladizo de la viga (4,226 cm) es de 2,566 cm.

En la imagen 4.30 se muestra una representación sólida de la deformación de las vigas superiores en relación con el resto de la estructura (exceptuando los forjados). Se ve claramente como la deformación de las vigas superiores es mucho más grande que la de las otras vigas, ya que la longitud del voladizo es mayor. Se observa también la influencia de los soportes en la deformación de las vigas, y la relación entre la indeformada, o posición inicial, y la deformación final.

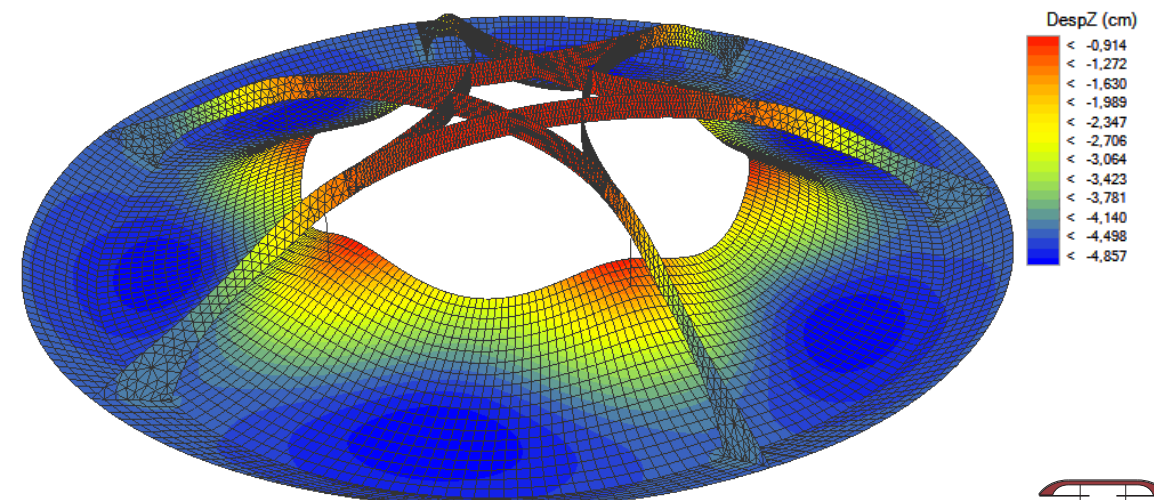


Imagen 4.29 Diagrama de deformación de las vigas superiores en ELS

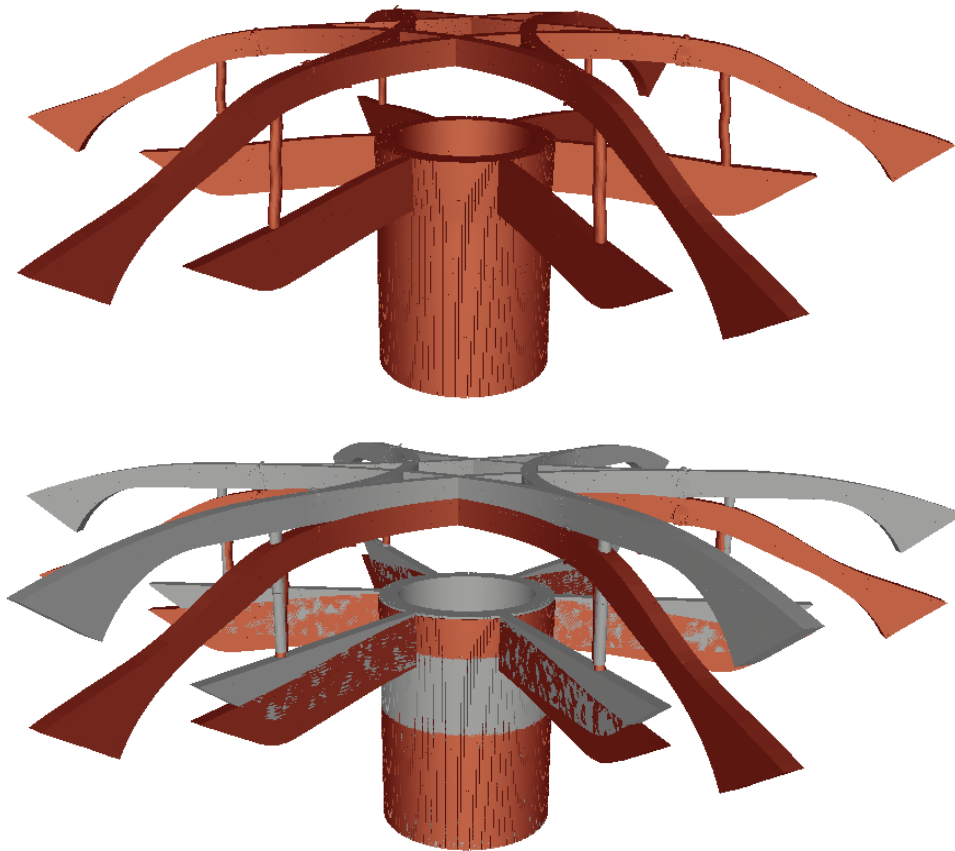


Imagen 4.30 Representación volumétrica de la deformación de las vigas superiores en relación con el resto de elementos estructurales. Arriba: deformada. Abajo: Relación entre la posición inicial (gris) y la deformada (rojo).

Otro aspecto interesante a analizar es la relación entre las tensiones y las deformaciones. En la imagen 4.31 se muestra el diagrama de tensiones sobre la deformada, de manera que se observa claramente como el forjado tercero estira de la cabeza de la viga generando esfuerzos de tracción en la parte inferior de la misma. También se observa como la deformación generada por el apoyo del pilar provoca un incremento de las tensiones positivas de tracción en la cara superior y como en las zonas de menor deformación se generan tensiones cercanas a 0 N/mm^2 .

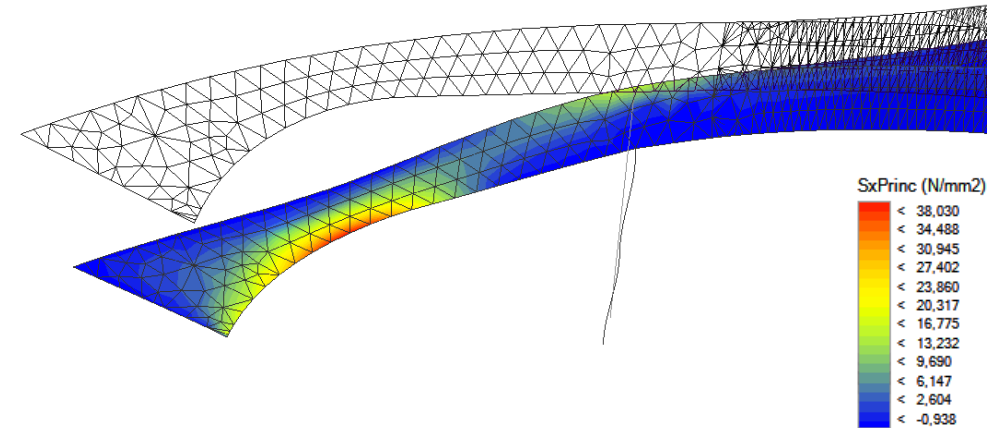
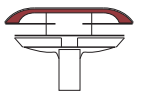


Imagen 4.31 Relación entre las tensiones S_x principales y la deformación de las vigas superiores

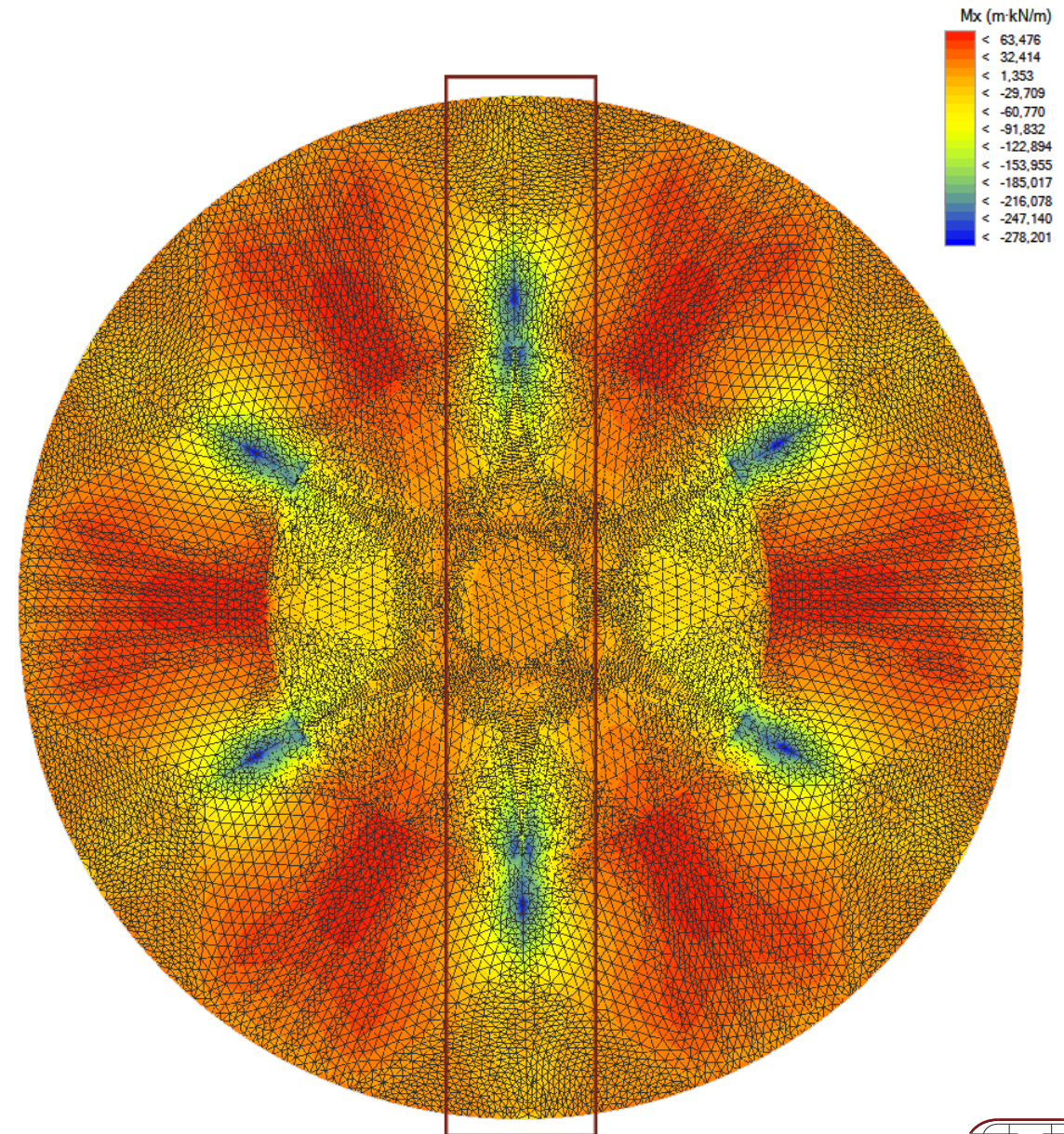
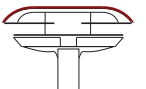


CUBIERTA

Igual que en el resto de forjados, en la cubierta nos interesa conocer los momentos flectores M_x y M_y , referentes a los ejes globales de la estructura. Del mismo modo que en los forjados, los momentos M_x servirán para analizar y armar la zona de la cubierta que apoya sobre las vigas (imagen 4.32) mientras que los momentos M_y se utilizarán para la zona situada entre dos vigas (imagen 4.34).

En la zona marcada en la imagen 4.32, los momentos M_x son mayoritariamente negativos. Sucede lo mismo que en el resto de forjados, ya que son los puntos de apoyo sobre las vigas. Dentro de esta zona, encontramos un momento negativo máximo (-210,75 kN·m) en la zona cercana al apoyo sobre el pilar. En el forjado tercero existían dos zonas de concentración de momentos negativos, ya que el forjado tenía dos puntos de apoyo. Sin embargo, en la cubierta solo existe un único punto de apoyo (el soporte) por lo que solo encontramos una zona de concentración de momentos negativos. A partir de este punto, los momentos van disminuyendo de valor, hasta llegar al momento negativo más pequeño de -8,4 kN·m. Este mínimo se produce en el lugar en el que la viga que sustenta la cubierta cambia de sección. Al aumentar la sección en el extremo de la viga los momentos negativos vuelven a aumentar ligeramente hasta llegar a los -50,1 kN·m.

Conviene recordar que aunque en el diagrama de la imagen 4.32 aparezcan momentos mayores a los comentados anteriormente, estos momentos no son reales ya que tenemos que tener en cuenta los ejes de referencia X e Y. Por este motivo solo nos interesan los momentos que se encuentran dentro de la zona marcada (ortogonal a los ejes X e Y).

Imagen 4.32 Diagrama de momentos M_x en ELU de la cubierta

Desde el apoyo del pilar hacia el centro de la cubierta, nos encontramos con que la zona de concentración de momentos negativos se alarga hacia el centro. Esto se debe a que en este lugar confluyen dos de las vigas que forman la estrella central, creando un punto de mayor rigidez que genera momentos negativos mayores. Desde aquí, el momento va disminuyendo, llegando a cambiar de signo y alcanzar los $2,75 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el centro de la cubierta.

Conviene destacar que cuando se cruza una de las vigas que forma la estrella central, el momento de la cubierta aumenta ligeramente debido a la rigidez que la viga transversal le genera (imagen 4.33).

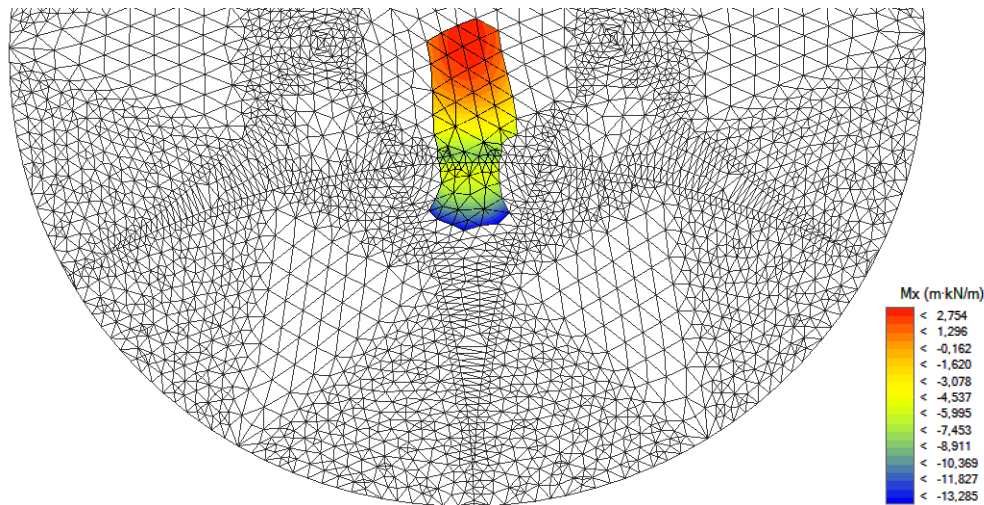
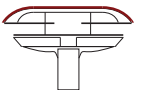


Imagen 4.33 Detalle de la zona central de la cubierta. Momentos negativos en la zona de apoyo sobre la viga



En la imagen 4.34 se muestra el diagrama de momentos M_y que nos ofrecerá los resultados para poder armar la cubierta en la zona situada entre las vigas, es decir, en centro de vano. Del mismo modo que ocurre con el resto de forjados, la cubierta se divide en 6 sectores. En el centro de estos sectores es donde se produce el momento positivo máximo ($93,73 \text{ kN} \cdot \text{m}$). Este momento va disminuyendo de forma casi concéntrica, llegando a ser negativo en la zona de apoyo sobre las vigas y en el borde de la cubierta. El zuncho perimetral del forjado inferior hace que en el borde de la cubierta los momentos también sean negativos, llegando a alcanzar los $-33,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

En la zona central de la cubierta los momentos son bastante menores (del orden de entre $23,18 \text{ kN} \cdot \text{m}$ y $-30,641 \text{ kN} \cdot \text{m}$), debido a la rigidez que le otorgan las vigas en forma de estrella. Dentro de esta zona central, los momentos negativos aparecen en las zonas cercanas a los encuentros con las vigas, mientras que los momentos positivos se sitúan en el centro de la cubierta ($2,75 \text{ kN} \cdot \text{m}$) y en los extremos más alejados de las vigas (imagen 4.35).

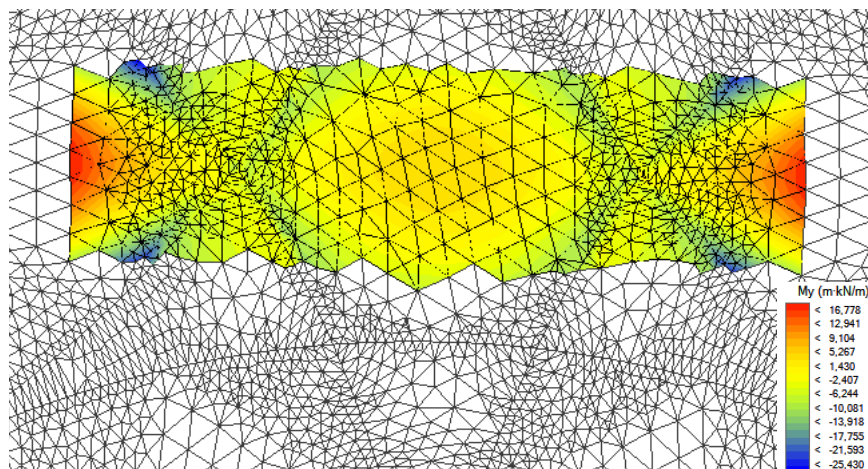


Imagen 4.35 Detalle de la zona central de la cubierta. Diagrama de momentos M_y en ELU

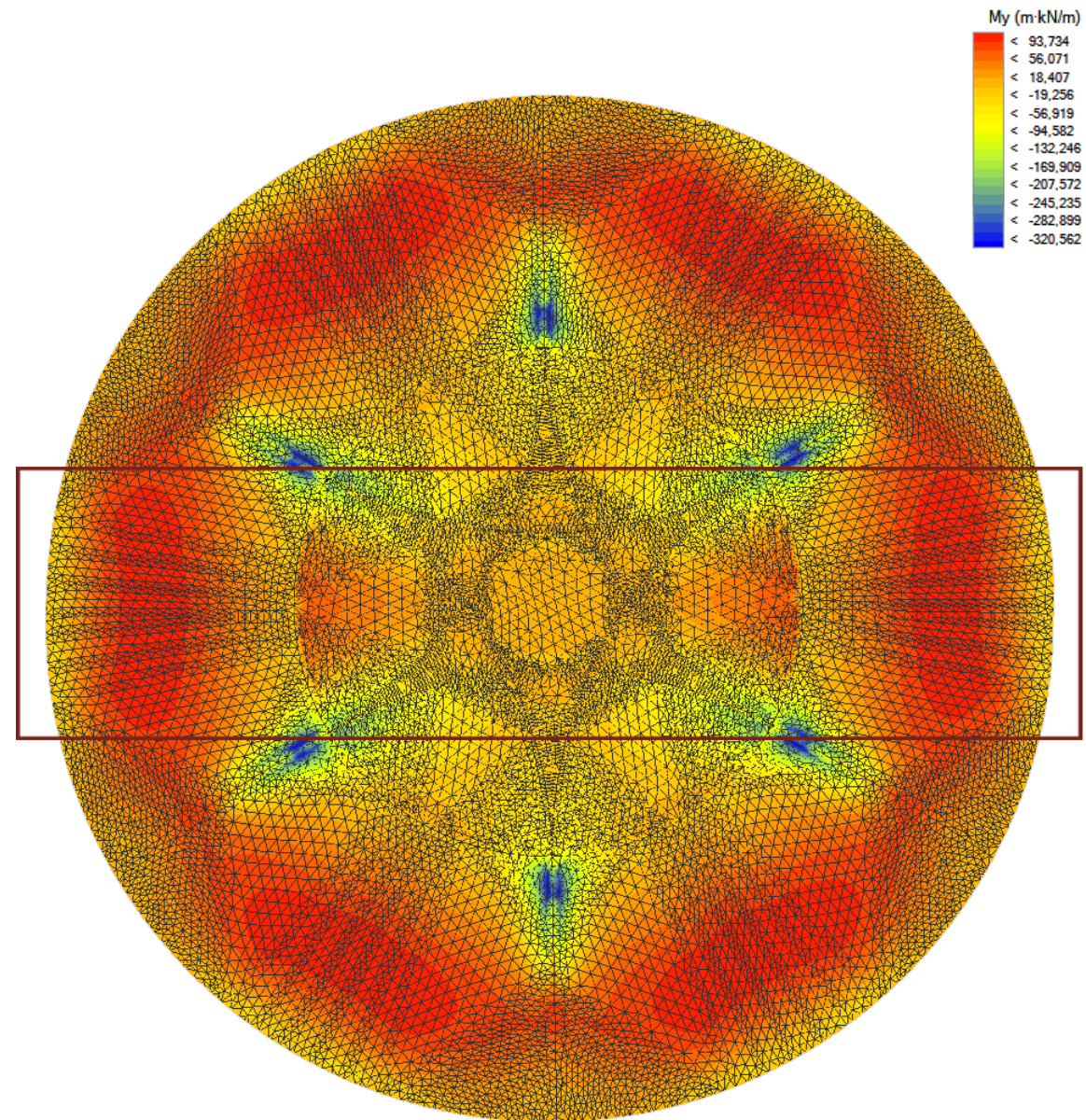
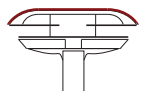


Imagen 4.34 Diagrama de momentos M_y en ELU de la cubierta



DEFORMACIONES

Otro aspecto a tener en cuenta en el análisis de la cubierta son las deformaciones producidas. En la imagen 4.36 se muestra el diagrama de deformaciones de la cubierta que, como el resto de forjados, presenta una forma de estrella en la que la zona central y las próximas a las vigas deforman menos.

En la zona central de la cubierta, donde se produce el encuentro de las 6 vigas en forma de estrella, es donde menor deformación se produce. El mínimo desplazamiento se sitúa justo en el centro y tiene un valor de 0,906 cm. Esta deformación es igual a la que se produce en el apoyo de la cubierta sobre las vigas curvas (0,906 = 0,91 cm) por lo que, a diferencia de lo que sucedía con las vigas, en la cubierta no existe ningún punto en el que la deformada sea positiva. Este desplazamiento de 9 mm se produce solidariamente en toda la zona central de la cubierta (no es una flecha relativa), y corresponde al acortamiento de los pilares.

Al acercarnos hacia el exterior de la cubierta el desplazamiento (la flecha) va aumentando. El desplazamiento máximo de la zona situada sobre la viga se produce en el extremo del voladizo, y es de 4,216 cm absolutos (lo mismo que la propia viga que lo sustenta), lo cual significa un desplazamiento relativo de 3,3 cm. En la zona entre las vigas el desplazamiento es mayor, llegando a un máximo de 4,822 cm. Sin embargo, este desplazamiento máximo no se produce en la zona más alejada del centro, como cabría esperar, sino que se produce en el centro de cada uno de los 6 sectores. El desplazamiento en el punto más alejado dentro de la zona de centro de vano es de 4,32 cm, muy similar a los 4,216 cm que se desplaza la cabeza volada de la viga. Esta peculiaridad se

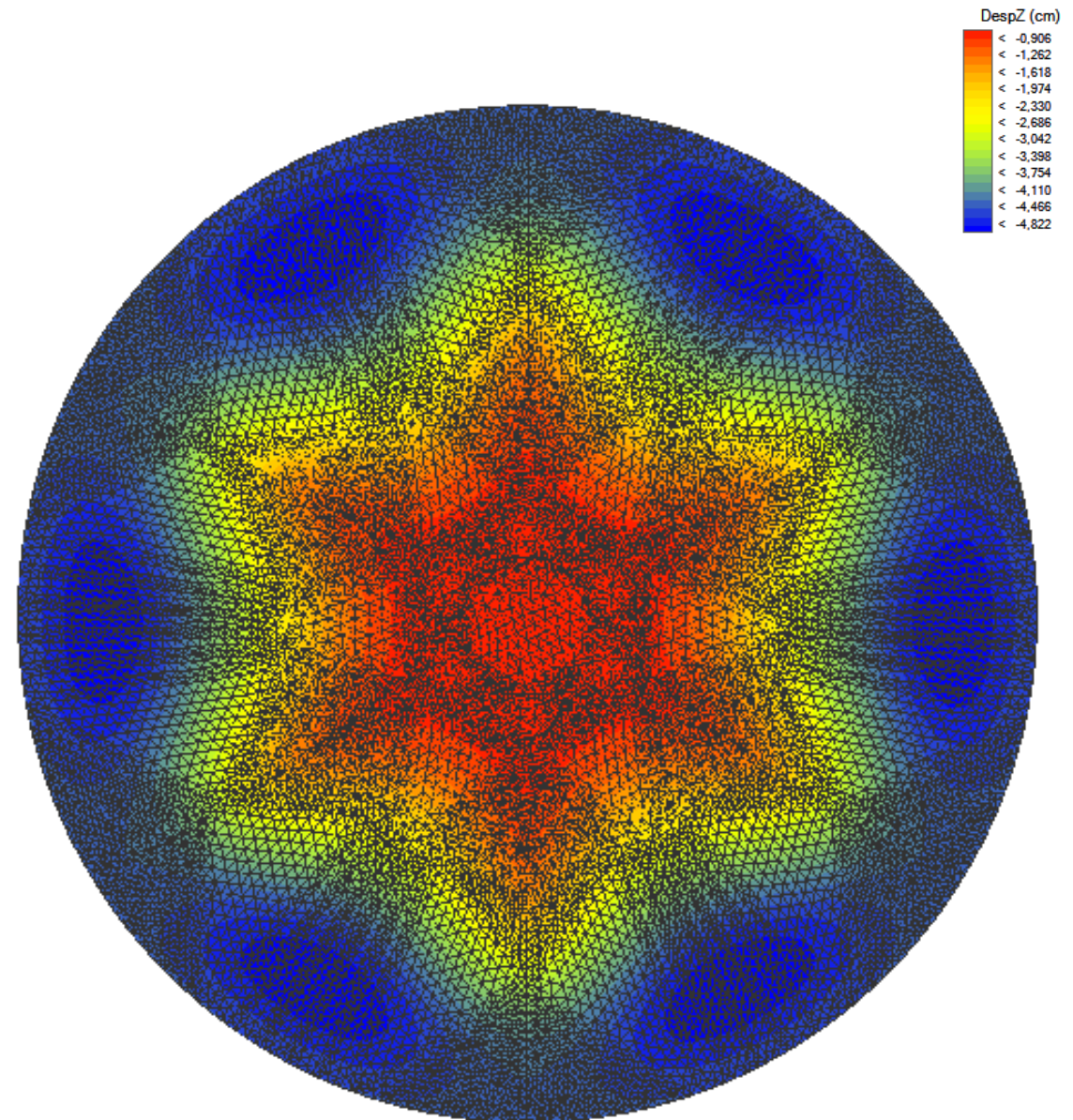
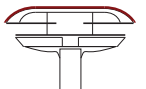


Imagen 4.36 Diagrama de deformaciones de la cubierta en ELS



aprecia claramente en la imagen 4.37 en la que se muestra el diagrama de colores de desplazamiento sobre la misma deformada. Se observa como todo el perímetro de la cubierta sufre el mismo desplazamiento vertical, a diferencia de lo que ocurría en el forjado segundo (también mostrado en la imagen 4.37)

El diferente comportamiento entre la cubierta y el forjado segundo (imagen 4.37) se debe al zuncho perimetral. El forjado 3 se quiebra en el extremo formando una especie de zuncho de gran canto (igual que el forjado 1) sobre el que apoya la cubierta. Este zuncho de atado hace que la deformación del perímetro del forjado 3, y por lo tanto de la cubierta, sea constante. Sin embargo la inexistencia de zuncho perimetral en el forjado 2 hace que la deformación máxima se produzca justo en el extremo del centro de vano, deformándose tal y como se aprecia en la imagen 4.37.

Esto hace que la cubierta trabaje como un tablero apoyado sobre sus cuatro lados (las dos vigas, el zuncho perimetral y el conjunto de vigas del centro) y por lo tanto la deformación máxima de 4,82 cm se produzca en el centro. En cambio el forjado segundo se asemeja a un tablero apoyado por 3 de sus lados, por lo que la deformación máxima tiene lugar en el extremo del centro de vano.

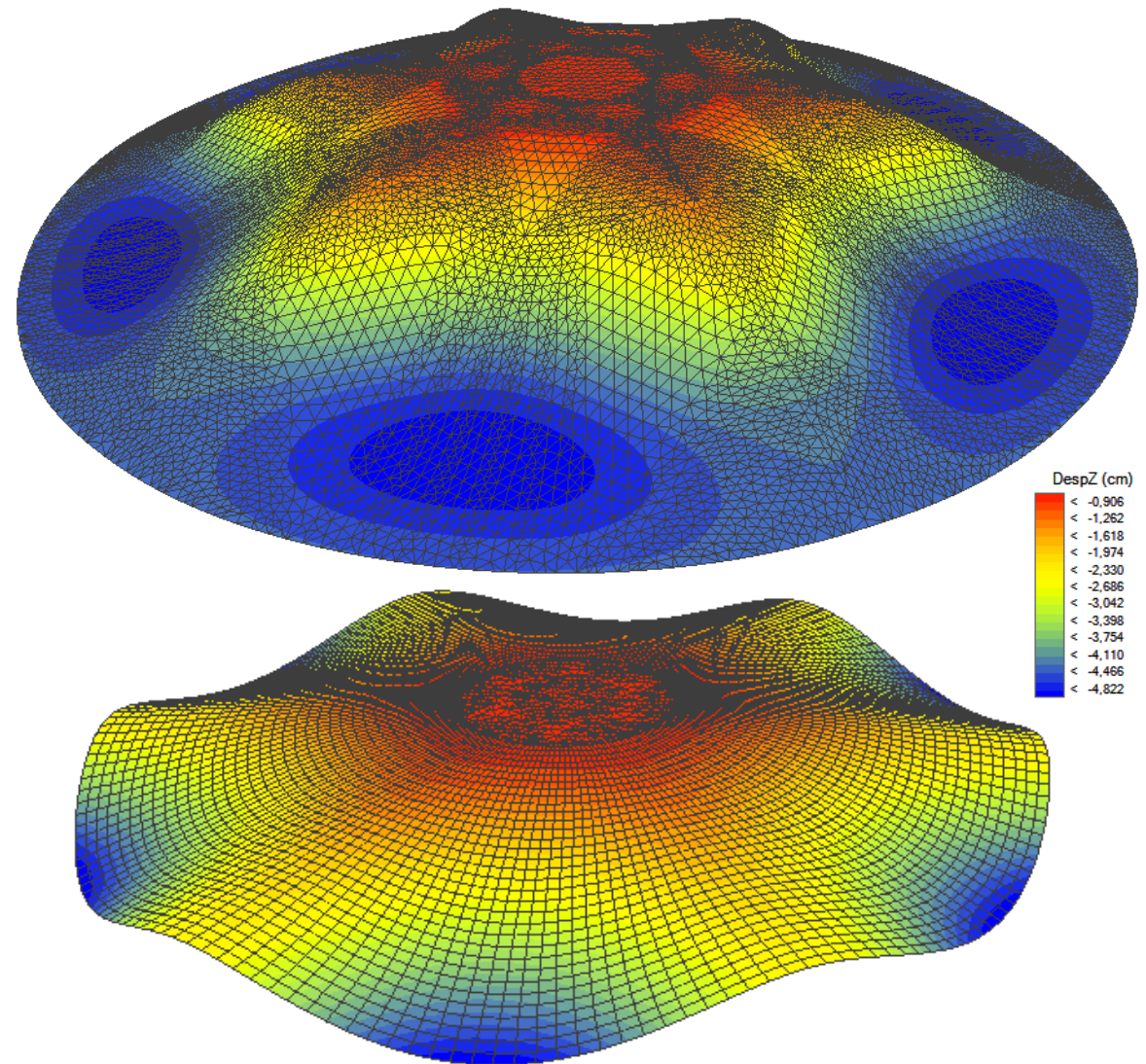
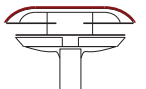


Imagen 4.37 Relación entre la deformación de la cubierta y la del forjado segundo



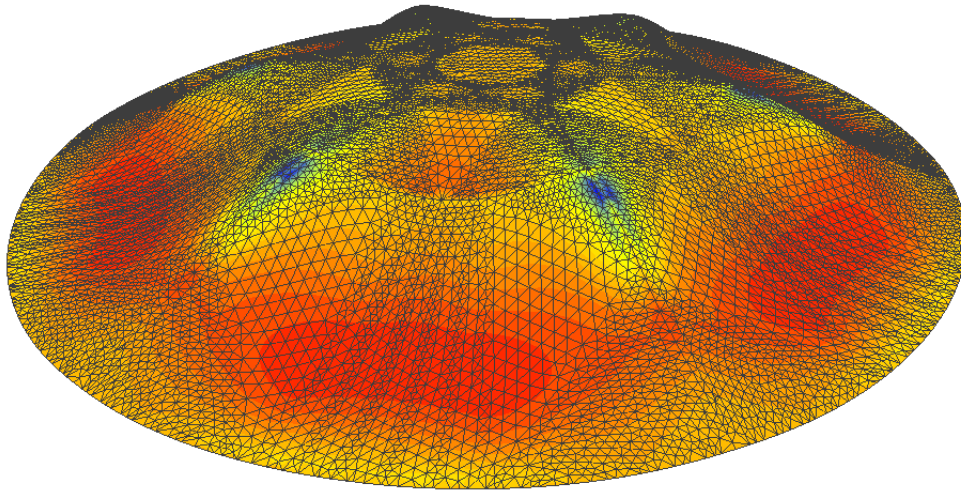


Imagen 4.38 Diagrama de tensiones sobre la deformada de la cubierta para establecer las relaciones tensión - deformación

La presencia de este “zuncho” de gran canto en el forjado superior, condiciona tanto la deformación de la cubierta como las tensiones de la misma. En la imagen 4.38 se establece esta relación entre la deformación y las tensiones de la cubierta, mostrando cómo en las zonas de unión con las vigas o con el zuncho perimetral las deformaciones son más pequeñas y las tensiones negativas. También se observa como en el centro de cada sector se produce la mayor deformación y el momento positivo más grande.

Por último, se muestran unas volumetrías de la deformada de la cubierta (imagen 4.39) en la que se aprecia la presencia de las vigas que la sustentan, marcando los puntos de menor deformación de la cubierta. Se observa cómo las vigas son mucho más rígidas que la cubierta, y son las encargadas de sustentar esta especie de “tela” de hormigón que se deforma adaptándose al esqueleto que la sustenta. Destaca también el desplazamiento del borde de la cubierta, que es constante a lo largo de todo el perímetro debido al “aro” estructural que lo rodea.

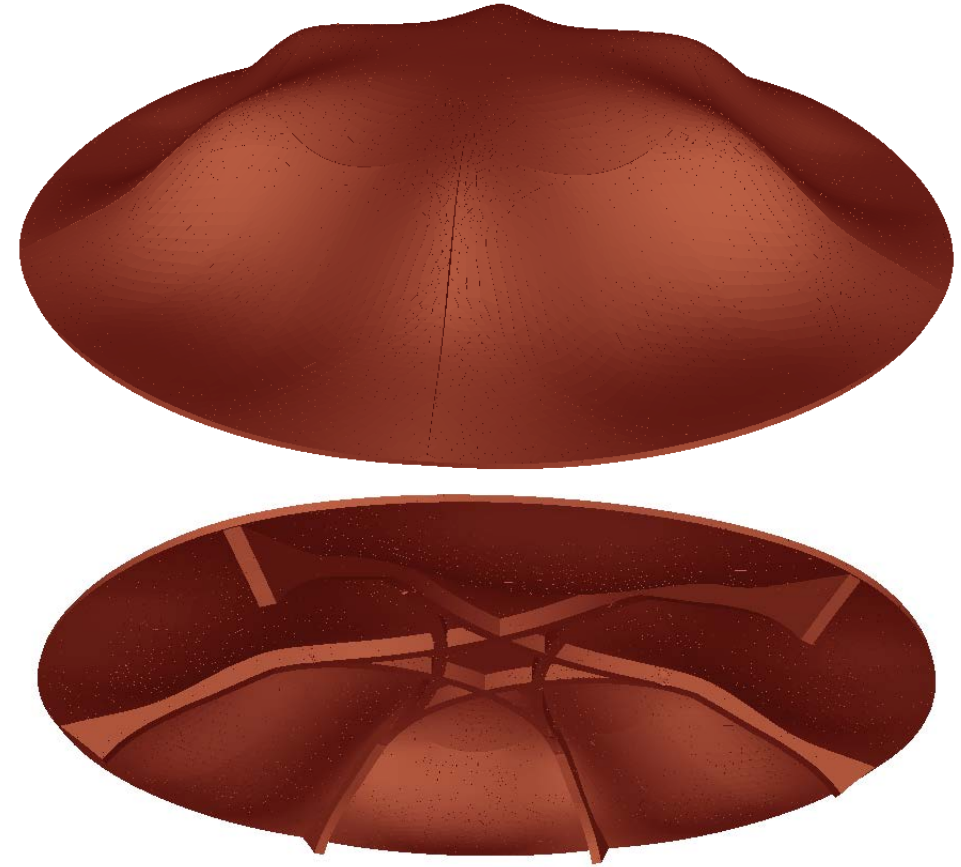


Imagen 4.39 Volumetría de la deformada de la cubierta. Arriba: vista aérea. Abajo: vista desde abajo

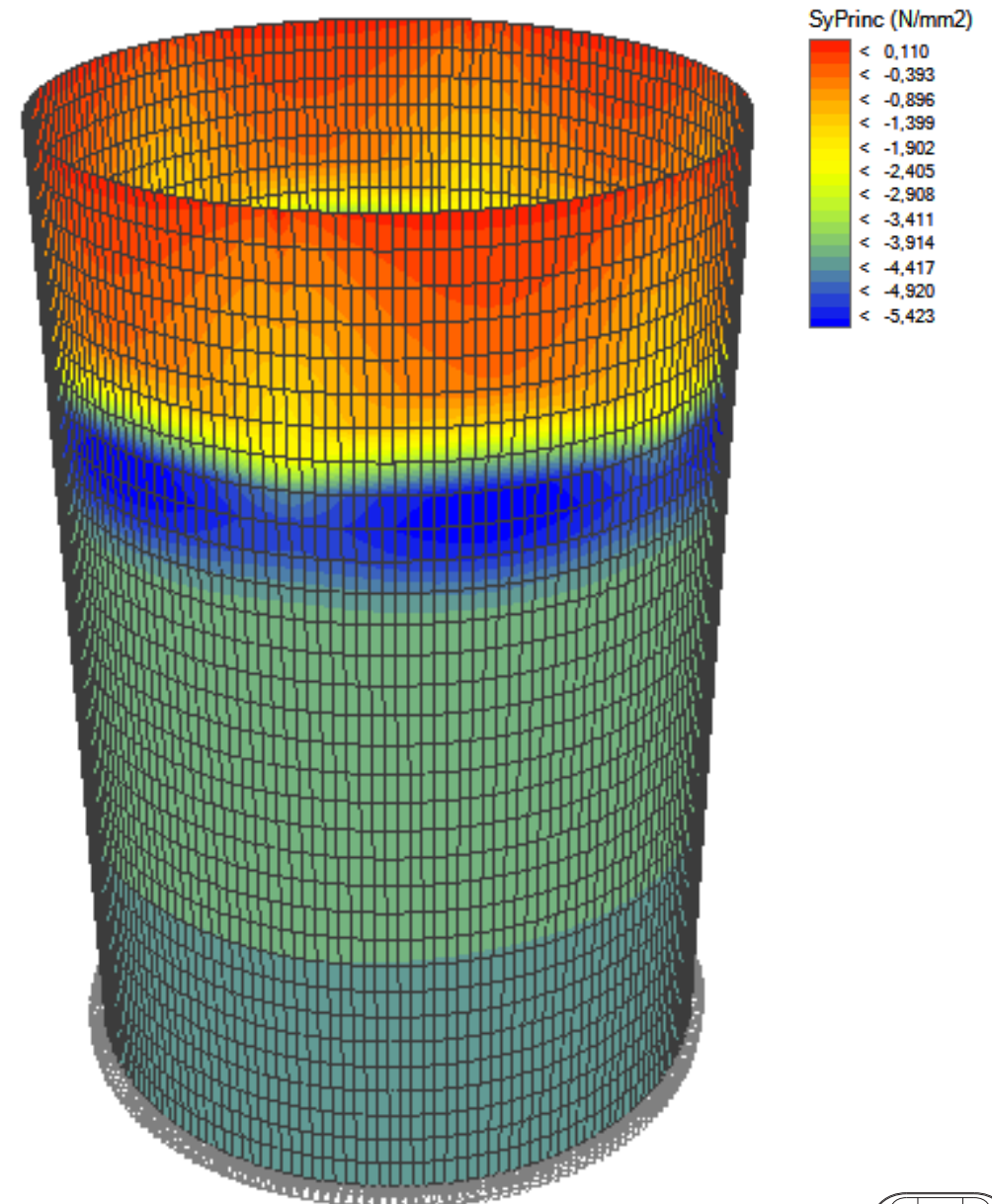
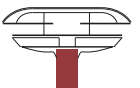
SOPORTE CENTRAL

Todas las partes de la estructura analizadas anteriormente conducen las cargas hasta un mismo elemento: el apoyo central. Este cilindro de nueve metros de diámetro y un metro de espesor es el encargado de transmitir las cargas de todo el edificio hasta la cimentación, y de ahí al terreno.

Debido a la forma cilíndrica del soporte, las tensiones referidas a los ejes globales de la estructura no nos aportan suficiente información. Por este motivo analizamos las tensiones según las direcciones principales, es decir, según los ejes locales de cada elemento finito. En la imagen 4.40 se muestran las tensiones según el eje principal S_y (vertical).

Como es lógico, y tal y como se ve en esta misma imagen, el soporte central trabaja casi completamente a compresión, llegando a una tensión máxima de compresión de $-5,423 \text{ kN/mm}^2$. Esta tensión máxima aparece en el encuentro del cilindro con el primer forjado. Debido al espesor del primer forjado en el punto de empotramiento con el soporte, la franja de tensión positiva máxima está desplazada ligeramente hacia abajo. Aparece otro anillo de tensiones de compresión máximas en la zona del empotramiento con la cimentación, alcanzando los $-4,15 \text{ kN/mm}^2$. Desde ambos anillos la tensión va disminuyendo hacia el centro del soporte, llegando a una tensión mínima de $-3,89 \text{ kN/mm}^2$ en el tercio superior (más próximo al encuentro con el primer forjado). Destaca como en los dos empotramientos del soporte es donde se producen las mayores tensiones de compresión.

En el tramo superior del cilindro, una vez superado el primer forjado, las tensiones son mucho menores. Esto se debe a que esta parte del cilindro no recibe todas las cargas de la estructura. Estas tensiones van disminuyendo con la altura hasta llegar a una tensión prácticamente nula de $-0,028 \text{ kN/mm}^2$. Las tensiones de compresión aumentan sutilmente al acercarnos al empotramiento de las vigas inferiores con el cilindro central (imagen 4.41). Sin embargo

Imagen 4.40 Tensiones principales S_y del soporte central

en el punto exacto de encuentro las tensiones son ligeramente menores, llegando a ser positivas en la zona superior de la viga (tracción de $0,11 \text{ kN/mm}^2$). Esto se debe a que las vigas estiran de la parte superior del soporte, lo cual desembocará en deformaciones que abren el cilindro en la parte superior como veremos en el apartado de deformaciones.

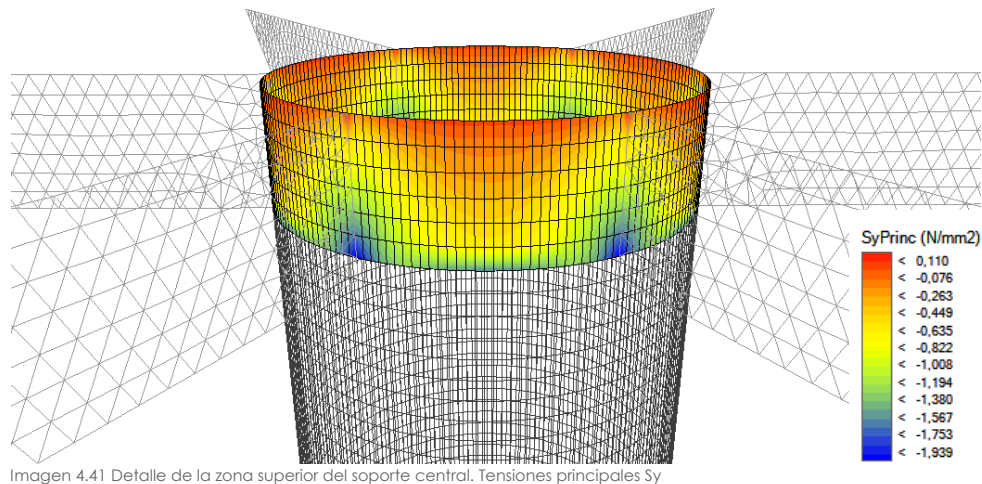


Imagen 4.41 Detalle de la zona superior del soporte central. Tensiones principales Sy

DEFORMACIONES

En cuanto a las deformaciones, distinguiremos la deformación vertical (desplazamiento Z) y la deformación respecto a la directriz del soporte (desplazamiento X). En la imagen 4.42 se muestra el diagrama de deformación según el eje vertical Z, y se observa como la zona superior sufre mayor desplazamiento que la inferior. Esto se debe a que la zona inferior se considera un empotramiento completamente rígido donde la deformación es nula. La deformación máxima ($0,108 \text{ cm}$) se produce en la coronación del apoyo debido al acortamiento del soporte. Esta deformación máxima, de poco más de un milímetro, se produce justo en la zona superior del encuentro de las vigas inferiores con el cilindro central, tal y como se observa en el detalle de la imagen 4.43.

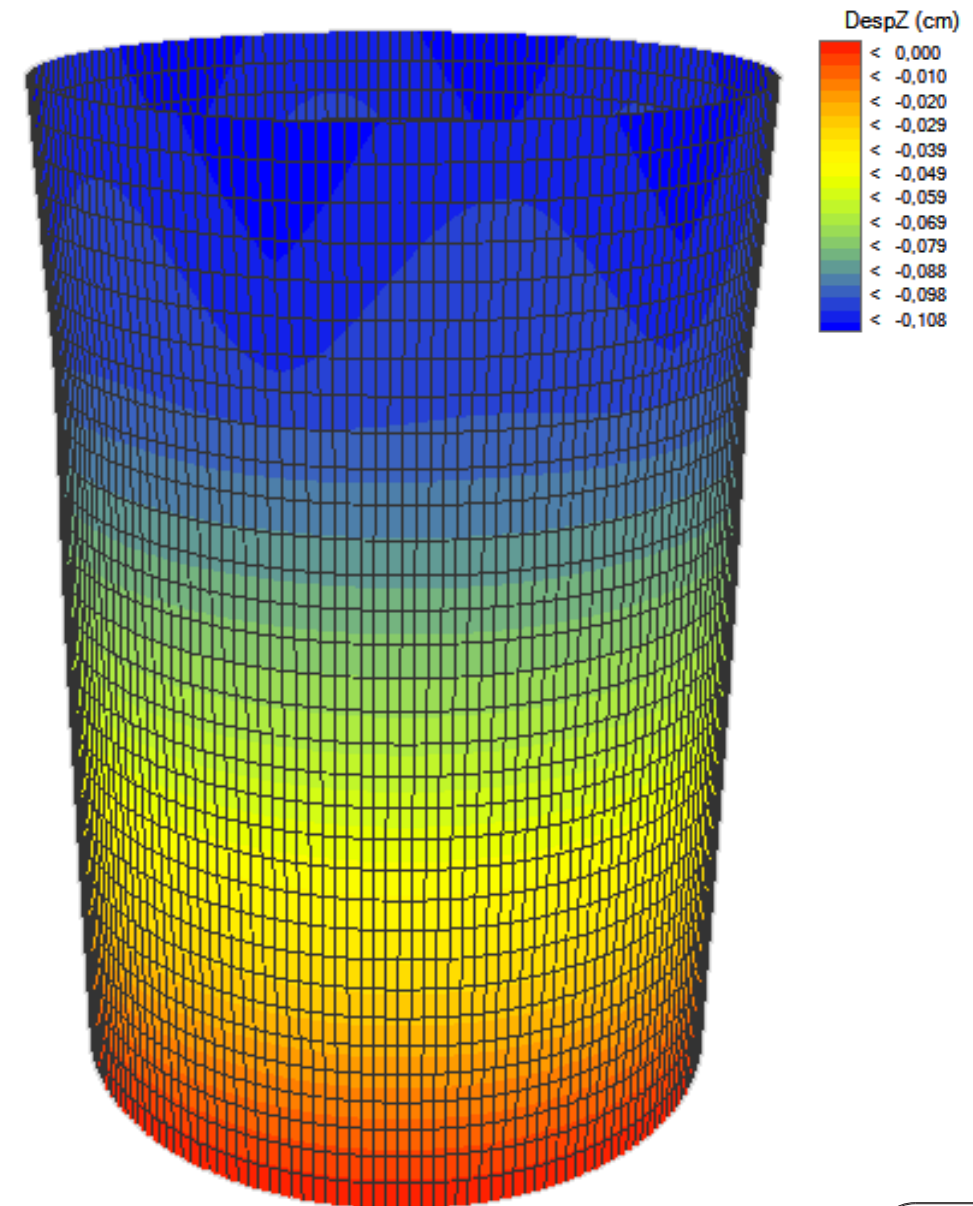


Imagen 4.42 Diagrama de deformaciones verticales en el fuste central en ELS

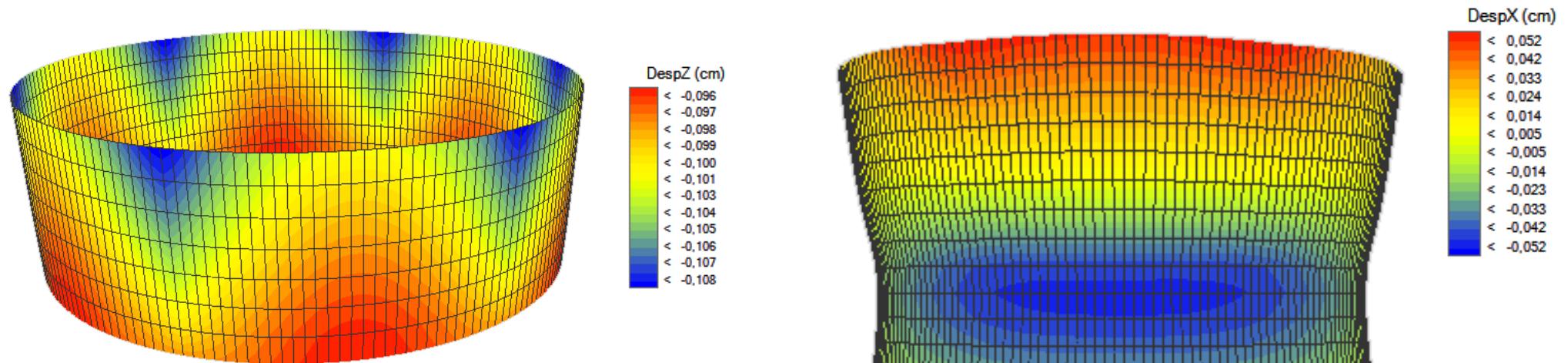


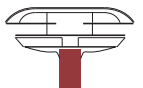
Imagen 4.43 Detalle del desplazamiento vertical en la zona superior del fuste central

Como podemos ver, el desplazamiento vertical es prácticamente despreciable ya que es poco más de un milímetro en los más de 12 metros de altura que tiene el apoyo central. Es más relevante (aunque los valores sean todavía menores) el desplazamiento en X que vemos en la imagen 4.44. Se produce un estrangulamiento del soporte en la zona del primer forjado, llegando a desplazarse hasta 0,045 cm hacia el interior.

Este estrangulamiento hacia el interior del soporte, junto con la fuerza de tracción que provocan las vigas inferiores, generan un desplazamiento de la cabeza del soporte hacia el exterior. La deformación máxima de la coronación del apoyo central llega a los 0,052 cm. El empotramiento inferior es indeformable, por lo que se genera un pequeño abombamiento de 0,011 cm en el fuste (imágenes 4.44 y 4.45)

Estos desplazamientos de alrededor de medio milímetro son insignificantes en un soporte cilíndrico de 9 m de diámetro y 1 m de espesor. Sin embargo, si que es interesante conocer la manera en la que deforma el apoyo central, y su relación con las tensiones máximas. En la imagen 4.45 se observa esta relación mostrando los valores de las tensiones sobre la deformada.

Imagen 4.44 Diagrama de la deformación transversal X del fuste central en estados límites de servicio



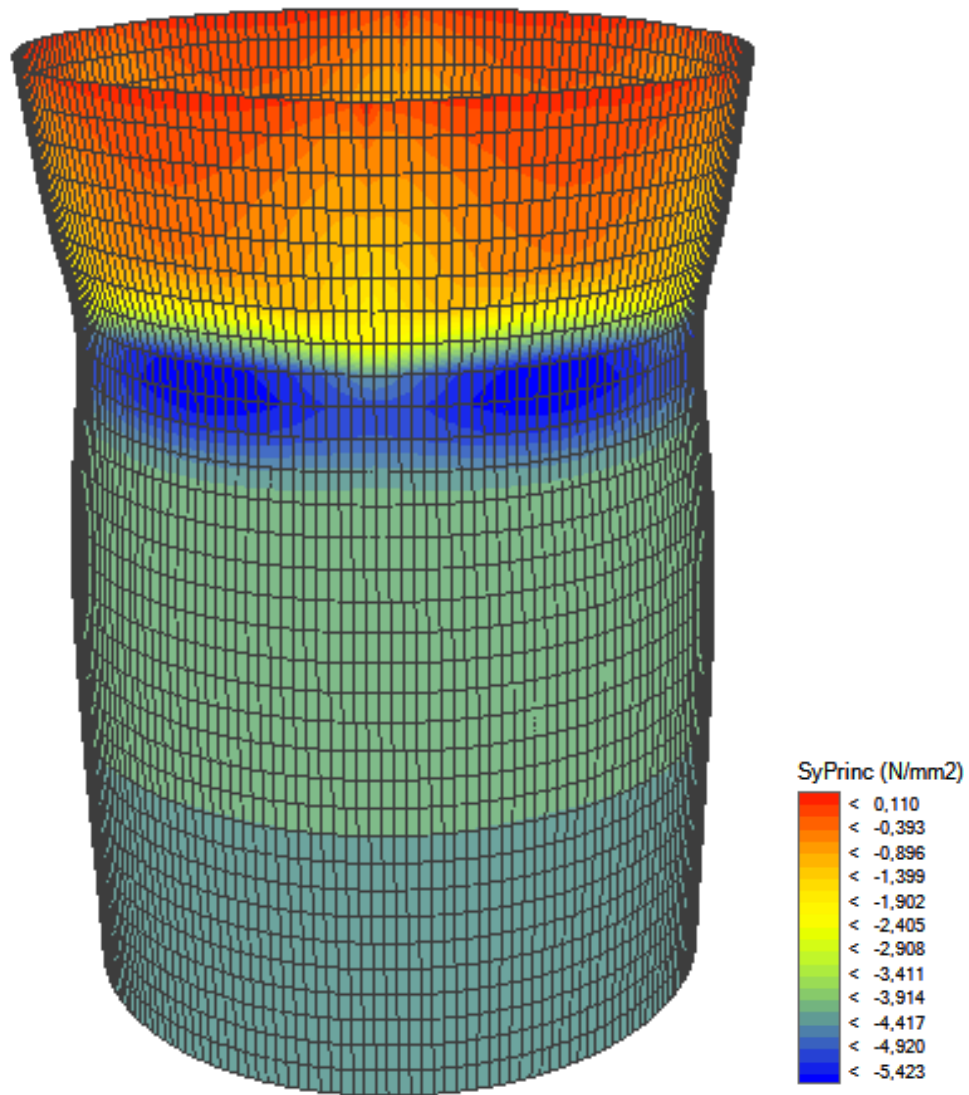
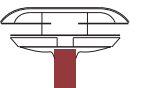


Imagen 4.45 Diagrama de tensiones sobre la deformada del fuste central. Relación tensión - deformación.



4.3 EFECTO DE CARGAS ASIMÉTRICAS

En el análisis realizado no se ha tenido en cuenta la acción variable del viento, debido a la complejidad que esto añade al modelo y al análisis. La posibilidad de hacer un estudio sobre el efecto del viento en la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói queda abierta como ampliación a este trabajo o como un posible trabajo independiente.

No obstante, se ha intentado hacer una aproximación de cómo responderá el edificio frente a una asimetría en la aplicación de las cargas de uso, que podría asimilarse a la acción del viento. Para ello se ha hecho una simplificación, dejando las cargas variables únicamente en la mitad del edificio. Debido a la geometría circular y regular del edificio, estas cargas verticales situadas solo en una parte del museo generan un giro similar al que podría generar una carga horizontal de viento. Con esto se pretende conocer cómo será la respuesta de la estructura frente a las acciones horizontales, aunque sea de manera conceptual y aproximada.

En la imagen 4.46 se muestra la deformación producida por el efecto de estas cargas excéntricas. En esta imagen observamos como el soporte central apenas se deforma, produciéndose todo el desplazamiento en la parte superior de la estructura. Se produce un giro entorno a la cabeza del soporte central, girando solidariamente toda la zona superior. Como es lógico, al producirse el giro sobre la parte superior del cilindro central, las zonas más elevadas (cubierta y vigas superiores) giran más que las zonas inferiores (forjado primero y vigas inferiores). Como vemos en la imagen 4.46, las vigas superiores sufren mayor deformación relativa que las vigas inferiores.

Si analizamos la deformación de alguno de los forjados (imagen 4.47: forjado intermedio) observamos que la diferencia de desplazamiento entre dos puntos idénticos situados en sectores opuestos es de 2,2 cm. El desplazamiento máximo en centro de vano es de 5,45 cm frente a los 3,25 cm en el centro de vano opuesto. En estos mismos puntos, la deformación obtenida sin tener en cuenta el viento es de 4,85 cm. Si comparamos este valor con los resultados

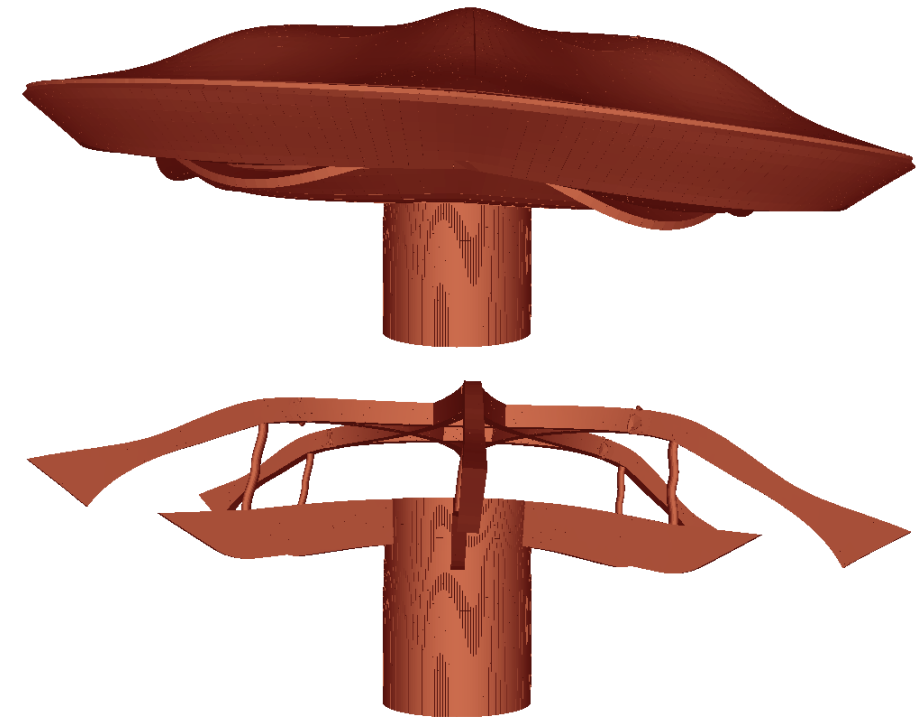


Imagen 4.46 Representación volumétrica de la deformada debida a la acción del viento

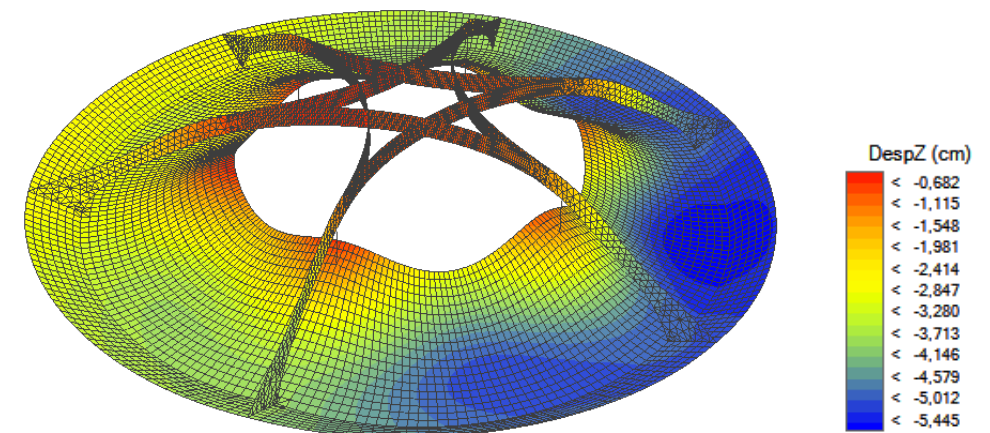


Imagen 4.47 Diagrama de deformaciones del forjado y vigas superiores. Influencia de la acción del viento

obtenidos debido a la acción del viento, observamos que uno de los puntos sufre un mayor desplazamiento mientras que en el otro el viento contrarresta la flecha provocada por las acciones gravitatorias, ayudando a que la deformación sea menor.

No obstante, observamos que en ningún punto del edificio se produce deformación positiva, es decir hacia arriba. Esto nos demuestra que la posible succión del viento no llegaría a provocar el levantamiento de la cubierta. Esto es bastante predecible ya que la cobertura es de un material muy pesado como es el hormigón. Si la cubierta fuese más ligera sería probable que aparecieran este tipo de problemas.

Analizando la influencia del viento sobre las vigas superiores (imagen 4.48), nos encontramos con que las tensiones máximas obtenidas no son mayores que cuando no actúa el viento (alrededor de los 38 N/mm²). Sin embargo, debido a la acción favorable del viento, sí que se observan unas tensiones

ligeramente menores en algunas de las vigas (30 N/mm²). La escasa variación de las tensiones respecto de los resultados obtenidos en el anterior análisis, se debe a que el viento provoca un giro conjunto de las vigas, sin generar desplazamientos relativos. En las vigas inferiores sucede lo mismo pero con menor intensidad, ya que tanto las tensiones como la influencia del viento son menores que en las vigas superiores.

De este análisis de tensiones podemos concluir que la acción del viento influye más en elementos superficiales como son los forjados que en las vigas y soportes.

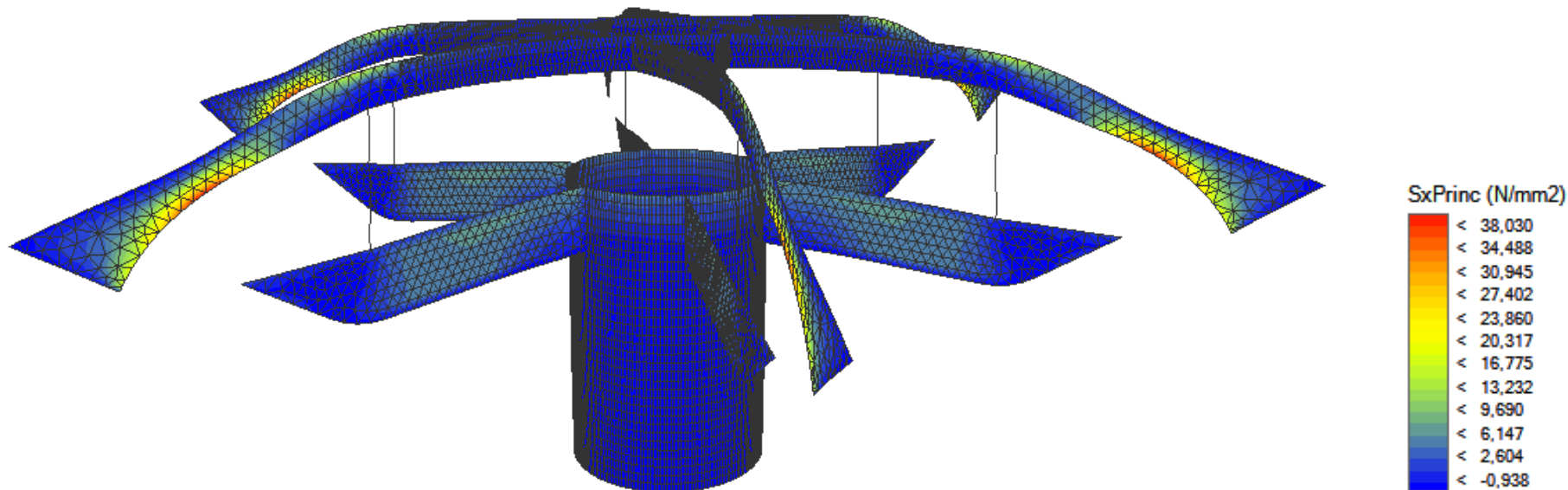


Imagen 4.48 Diagrama de tensiones de las vigas en relación con su deformada. Influencia de la acción del viento

5. CONCLUSIONES

5 CONCLUSIONES

En el trabajo realizado se explica el funcionamiento estructural del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói y se comprueba su adecuación al proyecto y a las intenciones buscadas por el arquitecto.

Hemos visto que se trata de una estructura singular, diferente de cualquier otra y con elementos estructurales complejos. Como se ha explicado, la estructura está formada básicamente por dos partes (imagen 5.1): en primer lugar, la parte inferior, formada por el apoyo central, el primer forjado y las vigas inferiores. Este conjunto genera una especie de tablero sobre el que apoya el resto de la estructura mediante 6 puntos de apoyo. La parte superior de la estructura está formada por los 6 pilares, las vigas superiores, los dos forjados restantes y la cubierta. El forjado intermedio apoya directamente sobre las mencionadas vigas inferiores. El forjado superior se encuentra apoyado sobre los pilares en la zona interna del forjado, y colgando de la cabeza de las vigas superiores en el perímetro. Los 6 pilares recogen todas las cargas que se generan en la última planta y las transmiten a las vigas inferiores. La totalidad de las cargas del edificio se transmiten mediante estas vigas hasta el soporte central.

En el presente estudio también se describen los mecanismos que utiliza Niemeyer para mejorar el comportamiento estructural y conseguir construir las grandes luces requeridas por este proyecto. Una de estas operaciones es el entrelazado de las vigas superiores formando una especie de estrella que trabaja conjuntamente. Con esto se consigue generar una zona especialmente rígida que trabaja solidariamente, pasando de tener 6 vigas a tener una especie de tablero resistente. Esto conduce a que las deformaciones relativas en esta zona sean prácticamente nulas, ya que los encuentros entre las vigas convierten la luz de 24 metros entre pilares en luces de menos de 10 metros. Además también consigue reducir la flexión y por lo tanto las tensiones de tracción. El análisis realizado muestra claramente la influencia de este entrelazado, tal y como se muestra en la imagen 5.2. En esta imagen vemos que la zona central apenas sufre deformación y soporta unas

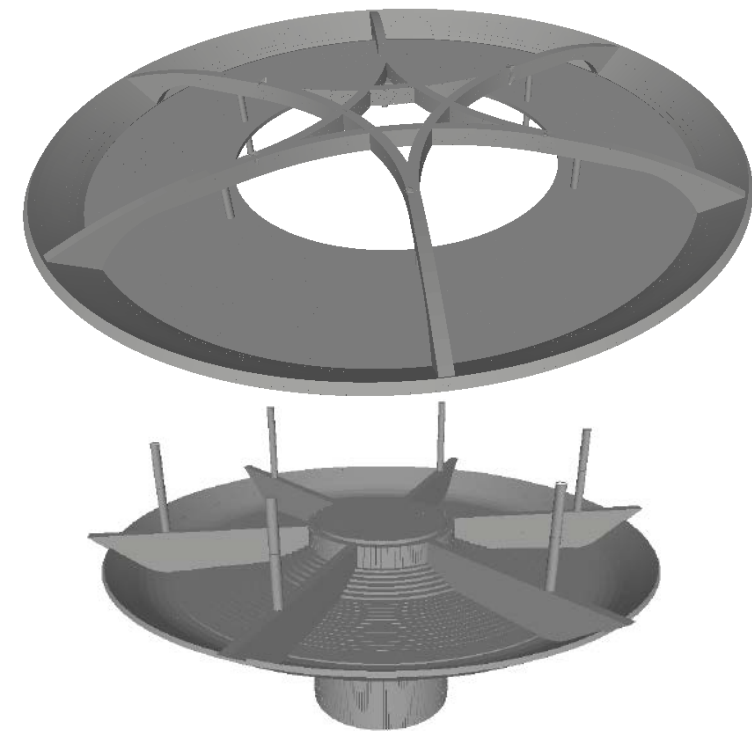


Imagen 5.1 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes

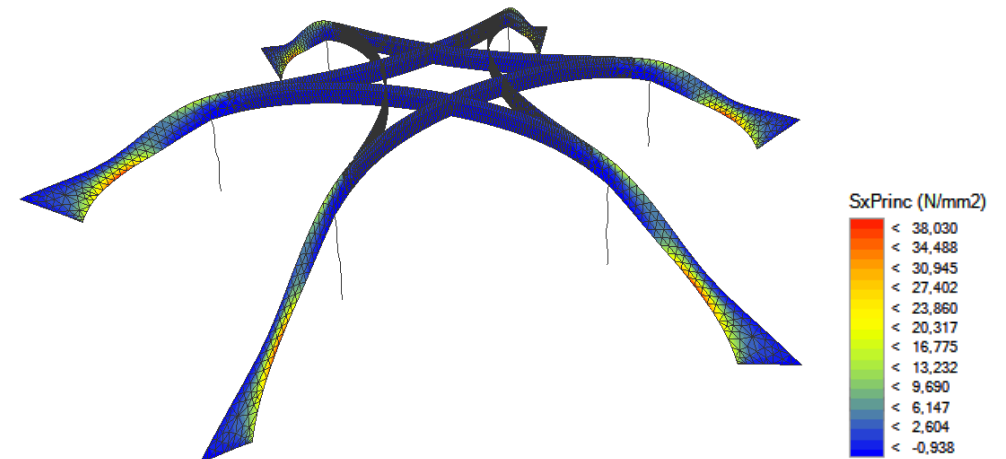


Imagen 5.2 Representación de las tensiones sobre la deformada de las vigas superiores. Influencia del entrelazado central

tensiones considerablemente menores que las zonas exteriores en las que las vigas trabajan individualmente.

Otro de los mecanismos utilizados para reducir las deformaciones y las tensiones son los grandes zunchos perimetrales en los forjados. Niemeyer genera un quiebro en el borde de los forjados, que le sirve para construir el cerramiento del museo, consiguiendo esa forma de cono invertido que pretende. El presente trabajo ha demostrado que, además de conseguir la forma deseada, este mecanismo mejora el funcionamiento estructural del edificio creando un zuncho de gran canto que da consistencia al borde del forjado. De este modo se consigue reducir considerablemente las deformaciones en el perímetro (imagen 5.2), lo cual es especialmente importante en una estructura que trabaja como un voladizo. Se aúna en una misma operación la solución formal y estructural, confirmándose en este estudio la vinculación forma - estructura que defiende Niemeyer. No son diseño y estructura por separado, es un único concepto indivisible. Como se explica en este estudio, gracias al apoyo del forjado segundo sobre las vigas inferiores, en este forjado no es necesaria la presencia de un zuncho perimetral como en los otros. En consecuencia, se puede generar la gran rasgadura perimetral que ofrece vistas del espectacular entorno. No obstante, en la imagen 5.3 vemos la influencia del zuncho en la deformación perimetral del forjado.

El cálculo realizado muestra que incluso utilizando estos mecanismos de diseño de la estructura; los importantes voladizos y las grandes luces hacen que sigan habiendo tensiones y deformaciones elevadas, siendo necesaria la utilización de grandes cantos. En las vigas superiores se utilizan cantos de 1,25 metros, que en el extremo se ensanchan para absorber los esfuerzos generados por la carga puntual colgada que provoca el forjado tercero. En las vigas inferiores, que reciben la totalidad de las cargas del edificio y las transmiten al soporte central, el canto ocupa la totalidad de la altura libre de

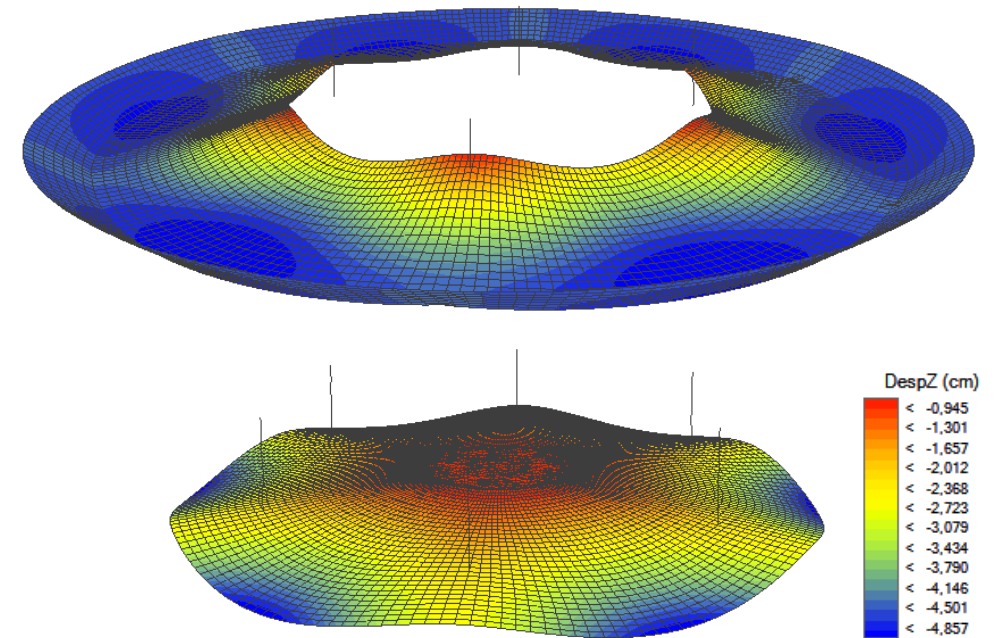


Imagen 5.3 Influencia del zuncho perimetral sobre el desplazamiento de los forjados tercero (arriba) y segundo (abajo).

la planta, llegando a los 2,7 metros de altura. Aun así, como hemos visto en el análisis, tanto en las vigas inferiores como en las superiores las tensiones son demasiado grandes para ser absorbidas por armadura pasiva. Se recurre a un armado postesado, que contrarresta el efecto del peso propio de la estructura generando tensiones contrarias en el interior de la viga. De este modo, la armadura pasiva solo tiene que absorber las tensiones provocadas por las acciones variables (fundamentalmente sobrecarga de uso), reduciendo así la cantidad de armado necesaria.

Otro elemento que conjuga especialmente la relación forma – estructura es el forjado primero. Hemos visto que este forjado de canto variable consigue generar la forma de copa que busca Niemeyer, a la vez que mejora el comportamiento estructural del edificio. Una vez más, estructura y forma se conjugan en un único concepto indivisible. Destaca también el papel de la estructura en la organización funcional del edificio. Las vigas inferiores separan los distintos espacios de administración de la primera planta. En la planta superior, los pilares y las vigas superiores marcan sutilmente las diferentes galerías expositivas, generando un espacio único pero diferenciado.

En definitiva, podemos concluir que la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói se adecúa a sus necesidades, con un diseño que propicia el buen comportamiento estructural. Además, hemos comprobado que la vinculación entre forma, función y estructura es total, tal y como defiende Niemeyer.

6. BIBLIOGRAFÍA

6.1 BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL

LIBROS:

ANDREAS, P., & FLAGGE, I. (2003). *Oscar Niemeyer. A legend of Modernism*. Frankfurt: Birkhäuser.

BOTEY, J. M. (1996 - 1997). *Oscar Niemeyer*. Barcelona: Gustavo Gili.

HESS, A., & NIEMEYER, O. (2009). *Oscar Niemeyer buildings*. New York: Rizzoli.

NIEMEYER, O. (1997). *Oscar Niemeyer: 1937 - 1997*. Tokyo: Toto.

NIEMEYER, O. (2000). *The curves of time: the memoirs of Oscar Niemeyer*. London: Phaidon.

PAPADAKI, S. (1964). *Oscar Niemeyer*. Barcelona: Bruguera S.A.

PELÁEZ, M. (2010). *Oscar Niemeyer*. Madrid: Unidad Editorial D.L.

PHILIPPOU, S. (2008). *Oscar Niemeyer. Curves of Irreverence*. New Have: Yale University Press

PUPPI, L. (1996). *Oscar Niemeyer 1907*. Roma: Officina.

TESIS:

LOURES GONÇALVES, S (2010). *Museus projectados por Oscar Niemeyer de 1951 a 2006: o programa como coadjuvante*. Orientador: Dr Rafael Antonio da Cunha Perrone. Tesis doctoral. Sao Paulo: Faculdade de Arquitectura e Urbanismo de Universidade de São Paulo.

PÁGINAS WEB:

BIOGRAFÍAS Y VIDAS. Oscar Niemeyer

<<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/n/niemeyer.htm>> [Consulta: 24 de febrero de 2015]

PLATAFORMA ARQUITECTURA. Biografía de Oscar Niemeyer [1907 – 2012]

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-214395/biografia-de-oscar-niemeyer-1907-2012>> [Consulta: 24 de febrero de 2015]

PLATAFORMA ARQUITECTURA. Oscar Niemeyer, en perspectiva

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758954/oscar-niemeyer-en-perspectiva>> [Consulta: 24 de febrero de 2015]

PLATAFORMA ARQUITECTURA. Documental: "La vida es un soplo" de Oscar Niemeyer

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-72549/cine-y-arquitectura-la-vida-es-un-soplo>> [Consulta: 28 de febrero de 2015]

PLATAFORMA ARQUITECTURA. Clásicos de Arquitectura: Museo de Arte Contemporáneo Niterói – MAC

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-58006/museo-de-arte-contemporaneo-mac-oscar-niemeyer>> [Consulta: 28 de febrero de 2015]

CENTRO NIEMEYER.

<<http://www.niemeyercenter.org/15/centro-niemeyer/22/oscar-niemeyer.html>> [Consulta: 03 de marzo de 2015]

WIKIARQUITECTURA. Museo de Arte Contemporáneo de Niterói

<http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Museo_de_Arte_Contempor%C3%A1neo_de_Niteroi> [Consulta: 03 de marzo de 2015]

LANACIÓN.COM. El universo curvo de Oscar Niemeyer

<<http://www.lanacion.com.ar/1691607-el-universo-curvo-de-oscar-niemeyer>> [Consulta: 12 de marzo de 2015]

MAC DE NITERÓI.

<<http://www.macniteroi.com.br/>> [Consulta: 03 de marzo de 2015]

FUNDACIÓN OSCAR NIEMEYER

<<http://www.niemeyer.org.br/>> [Consulta: 12 de marzo de 2015]

VÍDEOS:

"Museo de Arte Contemporáneo de Niterói - Oscar Niemeyer". *Youtube*
<<https://www.youtube.com/watch?v=qs8svt53a1l>>
[Consulta 27 de febrero de 2015. Publicado el 23 de junio de 2013 por Wilbert Abal]

Descripción: entrevista a Oscar Niemeyer sobre el Museo de Arte Contemporáneo de Niterói

"Infografía etsam - Oscar Abril Revuleta - MAC Niteroi – Construcción". *Youtube*
<<https://www.youtube.com/watch?v=E-pninAc3FE>>
[Consulta 03 de marzo de 2015. Publicado el 28 de junio de 2010 por osqar2002]

Descripción: Animación del MAC de Niterói en la que se muestra las distintas partes de la estructura

"Niemeyer's Contemporary Art Museum #5 - Interior 1st floor". *Youtube*
<https://www.youtube.com/watch?v=-pAyWsiR_60>
[Consulta 12 de marzo de 2015. Publicado el 8 de junio de 2008 por Sinisa Kolaric]

Descripción: Recorrido por el interior del museo desde el acceso por la planta primera

OTROS:

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación (DB SE – AE). 2009.
Ministerio de fomento, Gobierno de España

Programa informático de cálculo y análisis estructural Architrave®. Universitat Politècnica de Valencia. www.architrave.es

6.2 BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA

1 INTRODUCCIÓN

- 1.1 Plano de la ciudad de Brasilia <<http://www.biblioteca.fapyd.unr.edu.ar/leaves/archivo/urbanismo/imagenes-index/brasilia/plano.1.jpg>>
- 1.2 Vista desde Niterói <<http://www.flickrriver.com/photos/hiltonlebarbenchon/tags/vistaa%C3%A9rea/>>
- 1.3 Vista desde Río de Janeiro <http://solyarenaenbrasil.blogspot.com.es/2012_06_17_archive.html>
- 1.4 Copacabana. Río de Janeiro <<http://www.riodejaneiro.com/blog/2014/09/15/copacabana-beach-the-most-beautiful-place-on-the-earth/>>
- 1.5 Favelas en Río de Janeiro <<http://www.soyviajes.com/rio-de-janeiro.html>>
- 1.6 Oscar Niemeyer y Lúcio Costa proyectando la ciudad de Brasilia <<http://verynicethings.es/2013/10/lucio-costa/>>
- 1.7 Ministerio de Educación y Salud de Río de Janeiro. 1936 <http://urbipedia.com/index.php?title=Escuela_Carioca>
- 1.8 Le Corbusier y Oscar Niemeyer en Río de Janeiro <<http://www.giits.mx/OscarNiemeyerArquitecturainmortal/>>
- 1.9 Dibujo de Niemeyer <<http://www.laacademia.com.br/ordenyprogreso/?p=218>>
- 1.10 Iglesia San Francisco de Asís, Conjunto Pampulha. 1943. Belo Horizonte, Brasil <<http://www.brasilmasquefutbol.com/wp-content/uploads/2014/05/museos1.jpg>>
- 1.11 Casa das Canoas, <<https://openhousebcn.files.wordpress.com/2012/06/openhouse-barcelona-shop-gallery-architecture-oscar-niemeyer-casa-das-canoas-rio-de-janeiro-3.png>>
- 1.12 Dibujo de Niemeyer de la Casa das Canoas <<http://www.niemeyer.org.br/>>
- 1.13 Congreso Nacional, Ministerio de justicia, Palacio da Alvorada, Catedral de Brasilia. <<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-214395/biografia-de-oscar-niemeyer-1907-2012>>
- 1.14 Dibujos de Niemeyer de la Catedral de Brasilia y del Congreso Nacional. <<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-214395/biografia-de-oscar-niemeyer-1907-2012>>
- 1.15 Memorial de América Latina, São Paulo, 1987 <<http://blogs.iteso.mx/arquitectura/2013/11/29/se-incendia-el-memorial-de-la-america-latina-de-oscar-niemeyer/>>
- 1.16 Museo de Arte Contemporáneo de Niterói, 1991 <<http://maravillasdelmundo-cvd.blogspot.com.es/2011/10/museo-de-arte-contemporaneo-niteroi-rio.html>>
- 1.17 Elementos del "Caminho Niemeyer", en Niterói <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/11.044/3876>>

2 PROYECTO ARQUITECTÓNICO

- 2.1 Entorno. Ciudad de Río de Janeiro y ciudad de Niterói Fuente: Google Maps
- 2.2 Entorno. Ciudad de Río de Janeiro y ciudad de Niterói, el Corcovado y el Pan de Azúcar Fuente: Bing Maps
- 2.3 Plano de emplazamiento Fuente: PHILIPPOU, S. (2008). *Oscar Niemeyer. Curves of Irreverence*. New Have: Yale University Press, página 373
- 2.4 Vistas desde Niterói <<http://noticias.uol.com.br/album/2015/02/27/outra-visao-do-rio-de-janeiro.htm>>
- 2.5 Esquema realizado por Niemeyer <http://introarq13.blogspot.com.es/2013_06_01_archive.html>
- 2.6 Dibujo de Oscar Niemeyer. Relación con las montañas del entorno y las curvas de la mujer. <<http://www.primerbrieff.com/?p=15513>>
- 2.7 Relación MAM de Caracas y MAC de Niterói Fuente: PELÁEZ, M. (2010). *Oscar Niemeyer*. Madrid: Unidad Editorial D.L., página 81
- 2.8 Vista exterior del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói <<http://jacobogordon.com/el-ovni-de-oscar-niemeyer/jacobo>>
- 2.9 Vista a través de la rasgadura perimetral Fuente: ANDREAS, P., & FLAGGE, I. (2003). *Oscar Niemeyer. A Legend of Modernism*. Frankfurt: Birkhäuser, página 105
- 2.10 Lámina de agua bajo el museo. Vista aérea <<http://arquigeek.blogspot.com.es/2010/10/museo-de-arte-contemporaneo-niteroi-mac.html>>
- 2.11 Vista aérea del conjunto del MAC <http://web.educastur.princast.es/proyectos/jimena/pj_leontinaai/arte/webimarte2/WEBIMAG/SXX/ARQUITECTURA/niemey.htm>
- 2.12 Dibujo de Niemeyer. Vista de acceso al museo Fuente: PHILIPPOU, S. (2008). *Oscar Niemeyer. Curves of Irreverence*. New Have: Yale University Press, página 370
- 2.13 Rampa de acceso al museo <<http://noticias.arq.com.mx/Detalles/14066.html#.VZIP6fntmko>>
- 2.14 Secuencia de imágenes de la organización por plantas del museo Fuente: video "Infografía etsam - Oscar Abril Revuleta - MAC Niteroi – Construcción". Youtube

6.2 BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA

- 2.15 Croquis planta sótano Fuente: Tesis. LOURES GONÇALVES, S (2010). *Museus projectados por Oscar Niemeyer de 1951 a 2006: o programa como coadjuvante.*
- 2.16 Auditorio <http://oscar-niemeyer.blogspot.com.es/2011_05_01_archive.html>
- 2.17 Restaurante <http://www.tripadvisor.com/LocationPhotoDirectLink-g303500-d317940-i69192644-Museu_De_Arte_Contemporanea-Niteroi_State_of_Rio_de_Janeiro.html#69192657>
- 2.18 Sala de exposiciones principal Fuente: ANDREAS, P., & FLAGGE, I. (2003). *Oscar Niemeyer. A legend of Modernism.* Frankfurt: Birkhäuser, página 104
- 2.19 Sala de exposiciones principal <<http://deixadefrescura.com/2013/09/mac-museu-arte-contemporanea-niteroi.html>>
- 2.20 Galería perimetral de exposiciones <http://www.archdaily.com.br/br/01-81036/classicos-da-arquitetura-museu-de-arte-contemporanea-de-niteroi-oscar-niemeyer/81036_81050>
- 2.21 Acceso a la planta superior de galerías <<https://brazilsarchitecture.wordpress.com/>>
- 2.22 Galería de exposiciones <<http://openbuildings.com/buildings/niteroi-contemporary-art-museum-profile-44687/media/329061/show>>
- 2.23 Iglesia San Francisco de Asís <<http://www.niemeyer.org.br/>>
- 2.24 Soporte central del MAC de Niterói <<http://arqsos.blogspot.com.es/2012/12/museo-de-arte-contemporaneo-niteroi.html>>
- 2.25 Vista de la plaza, en relación con el entorno y con el MAC <http://oscar-niemeyer.blogspot.com.es/2011_05_01_archive.html>
- 2.26 Materialidad de la plaza <<http://barcelona.b-guided.com/noticias/b-ing/encuentro-con-oscar-niemeyer-174.html>>
- 2.27 Geometría y estructura de la rampa de acceso al MAC Fuente: NIEMEYER, O. (1997). *Oscar Niemeyer: 1937 - 1997.* Tokyo: Toto.
- 2.28 Acceso y encuentro de la rampa de acceso con el edificio <<http://www.flickrriver.com/photos/47333265@N00/tags/museum/>>
- 2.29 Vista de la rampa a nivel de peatón desde el inicio <<http://www.flickrriver.com/photos/47333265@N00/tags/museum/>>
- 2.30 Interior del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói <<http://deixadefrescura.com/2013/09/mac-museu-arte-contemporanea-niteroi.html>>
- 2.31 Tensores de la armadura postesada de las vigas pared de planta primera <<http://www.macniteroi.com.br/>>
- 2.32 Armadura de espera para el encuentro de la rampa con el acceso al museo <<http://www.macniteroi.com.br/>>
- 2.33 Armadura pasiva de la cimentación y arranque del cilindro central <<http://www.macniteroi.com.br/>>
- 2.34 Estructura en construcción <<http://www.macniteroi.com.br/>>
- 2.35 Construcción de la rampa de acceso <<http://www.macniteroi.com.br/>>

3 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

- 3.1 Boceto de idea inicial realizado por Niemeyer <http://introarq13.blogspot.com.es/2013_06_01_archive.html>
- 3.2 Funcionamiento estructural de una copa y de un árbol <<http://www.actitudfem.com/hogar/recetas-de-cocina/cocina/en-que-copa-va-cada-vino>>
- 3.3 Museo de Arte Contemporáneo de Niterói <<http://www.taringa.net/posts/imagenes/1971067/Interesante-y-exotico-No-dejes-de-mirarlo.html?dr>>
- 3.4 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 3.5 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 3.6 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói. Alzado Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 3.7 Discretización de una geometría real a una modelización de elementos finitos <<http://www.frbb.utn.edu.ar/utec/utec/9/n03.html>>
- 3.8 Discretización del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói en elementos finitos Fuente: elaboración propia mediante el programa AutoCad
- 3.9 Posible discretización del MAC de Niterói en elementos finitos Fuente: NIEMEYER, O. (1997). *Oscar Niemeyer: 1937 - 1997.* Tokyo: Toto.
- 3.10 Modelización del cilindro central y la cimentación en elementos finitos Fuente: elaboración propia mediante el programa AutoCad
- 3.11 Modelización del primer forjado en elementos finitos Fuente: elaboración propia mediante el programa AutoCad

6.2 BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA

- 3.12 Elementos finitos representados con espesor. a) superior: modelización real b) inferior: modelización correcta Fuente: elaboración propia mediante AutoCad
- 3.13 Tensores de las vigas inferiores de hormigón postesado Fuente: PHILIPPOU, S. (2008). *Oscar Niemeyer. Curves of Irreverence*. New Have: Yale University Press
- 3.14 - 3.20 Modelización de los distintos elementos de la estructura Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 3.21 Tabla 3.1 del DB SE-AE. Capítulo 3 Acciones variables Fuente: CTE. Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación (DB SE – AE)
- Tabla 3.1 Resumen de acciones sobre la estructura Fuente: elaboración propia

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 4.1 - 4.48 Resultados del análisis. Solicitaciones, tensiones y deformaciones Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- Tabla 4.1 Cálculo de la armadura de tracción necesaria en el punto A Fuente: elaboración propia
- Tabla 4.2 Cálculo de la armadura de tracción necesaria en el punto B Fuente: elaboración propia

5 CONCLUSIONES

- 5.1 Modelo 3D de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo de Niterói por partes Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 5.2 Representación de las tensiones sobre la deformada de las vigas superiores. Influencia del entrelazado Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]
- 5.3 Influencia del zuncho perimetral sobre el desplazamiento de los forjados tercero y segundo Fuente: elaboración propia mediante el programa Architrave[®]

