

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

TRABAJO FINAL DE GRADO

ESTUDIO, ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN MEDIANTE SAP2000 DE
LA ESTRUCTURA DEL CENTRO ROBERTO GARZA SADA

TUTOR: DAVID GALLARDO LLOPIS
ALUMNO: SAMUEL RUBIO PALLARDÓ

RESUMEN

Uno de los principios básicos que destacaba Vitruvio era la firmeza o "*Firmitas*", hablaba de la sustentación sólida del edificio, de la estructura.

La estructura es la parte más importante de cualquier obra porque de ella depende la seguridad de sus ocupantes.

En este trabajo se ha realizado el estudio al completo de una estructura singular como es el CRGS, un reto estructural al servicio del arquitecto Tadao Ando.

Primero se realizará un análisis del arquitecto y de su obra, destacando los aspectos más importantes de su arquitectura, para posteriormente, estudiar y comprender el edificio en cuestión.

A continuación se muestra la modelización del edificio, procediendo a enumerar los aspectos que se han tenido en cuenta a la hora de analizar la estructura. Así como una explicación del proceso de cálculo mediante el programa SAP2000.

Y por último, se analizarán los resultados obtenidos del programa para comprobar la solución adoptada y la estabilidad estructural.

PALABRAS CLAVE:

ESTRUCTURA / SAP2000 / MODELIZACIÓN / ANÁLISIS / CRGS

ABSTRACT

One of the basic principles that stood out Vitruvius was the firmness or "Firmitas", he spoke of the solid support of the building, of the structure.

Structure is the most important part of any work because it depends on the safety of its occupants.

In this work has been carried out complete study of a singular structure such as the CRGS, a structural challenge at the service of the architect Tadao Ando.

First, an analysis of the architect and his work will be carried out, highlighting the most important aspects of his architecture, to later study and understand the building in question.

Below is the modeling of the building, proceeding to list the aspects that have been taken into account when analyzing the structure. As well as an explanation of the calculation process through the SAP2000 program.

Finally, the results obtained from the program will be analyzed to verify the adopted solution and the structural stability.

KEY WORDS

STRUCTURE / SAP2000 / MODELING / ANÁLISIS / CRGS

RESUM

Un dels principis bàsics que destacava Vitruvi era la fermesa o "Firmitas", parlava de la sustentació sòlida de l'edifici, de l'estructura.

L'estructura és la part més important de qualsevol obra perquè depèn la seguretat dels seus ocupants.

En aquest treball s'ha realitzat l'estudi al complet d'una estructura singular com és el CRGS, un repte estructural al servei de l'arquitecte Tadao Ando.

Primer es realitzarà un anàlisi de l'arquitecte i de la seva obra, destacant els aspectes més importants de la seva arquitectura, per a posteriorment, estudiar i comprendre l'edifici en qüestió.

A continuació es mostra la modelització de l'edifici, procedint a enumerar els aspectes que s'han tingut en compte a l'hora d'analitzar l'estructura. Així com una explicació del procés de càlcul mitjançant el programa SAP2000.

I finalment, s'analitzaran els resultats obtinguts del programa per comprovar la solució adoptada i l'estabilitat estructural.

PARAULES CLAU:

ESTRUCTURA / SAP2000 / MODELIZACIÓ / ANÀLISI / CRGS

CONTENIDOS

1. OBJETIVOS

2. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

2.1 EL ARQUITECTO: TADAO ANDO

2.2 EL PROYECTO: PUERTA DE LA CREACIÓN "GATE OF CREATION"

2.3 SISTEMA ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO Y CONSTRUCCIÓN

3. MODELO DE CÁLCULO

3.1 GEOMETRÍA

3.2 SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS

3.3 MATERIALES Y SECCIONES UTILIZADAS

3.4 CONDICIONES DE ENLACE

3.5 CARGAS, HIPÓTESIS Y COMBINACIONES

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5. CONCLUSIONES

6. BIBLIOGRAFÍA

2. PROYECTO ARQUITECTÓNICO

2.1 EL ARQUITECTO: TADAO ANDO

Tadao Ando nació en 1941 en la ciudad de Osaka, Japón. Fue galardonado con el premio Pritzker de Arquitectura, en 1995 y el Praemium Imperiale de Japón en 1996.

Arquitecto de formación autodidacta, cuyos conocimientos fue adquiriendo a través de viajes por toda Europa y Asia. Le impresionaron obras como el Partenón de Atenas o el Panteón de Agripa, así como los templos y palacios de las ciudades de Kyoto y Nara. Tiene influencias de otros grandes arquitectos como LeCorbusier, Louis Kahn, Mies van der Rohe o Luis Barragán.



Imagen 1. Panteón de Agripa, Roma

Sus propuestas no siguen un estilo o una moda sino que su arquitectura expresa el carácter japonés y un deseo de que se identifique con el sitio para la que fue creada; conjuga condiciones locales, tradición y cultura.¹

Sus primeras obras eran, sobre todo, casas y construcciones pequeñas. En esta época destaca el uso predominante del hormigón y la integración de la luz como elemento, que le es tan característico. Diseños basados en elementos y formas geométricas simples.

El segundo periodo se caracteriza por la realización de edificios públicos, destacando templos y museos. En este periodo el lenguaje de Ando se va imponiendo sobre los excesos del posmodernismo o las demandas del *high tech*. También es la época donde algunos elementos toman carta de identidad en su trabajo, como hundir edificaciones, la presencia de patios, el uso de la curva y la integración con el paisaje. Cabe mencionar obras como la Iglesia de la Luz, 1989; el Templo del Agua, 1991; el Museo de la Madera, 1994 o el Espacio de Meditación de la UNESCO, 1995.

En la actualidad, Ando desborda su creatividad en formas novedosas y complejas, oscilando entre los principios formales de épocas pasadas y la libertad de expresión. Principios que se encuentran claramente en el Centro Roberto Garza Sada.²

Izquierda:
Imagen 2.
Templo del agua.



Derecha:
Imagen3. Iglesia
de la luz



¹ Existen números referencias sobre la vida de Tadao Ando, en concreto esta parte se ha abstraído del libro Auping, Michel y Ando, Tadao, conversaciones y Ando, Tadao, Complete works

².Dal Co, Franceso, complete works. UDEM, CRGS

2.2 EL PROYECTO: PUERTA DE LA CREACIÓN GATE OF CREATION



Imagen 4. Boceto del CRGS realizado por Tadao Ando

El proyecto denominado *Gate of Creation*, como la mayoría de los trabajos de Tadao Ando surge para el sitio y el tiempo en el que se realiza.

En México se erigieron numerosas entradas y arcos conmemorativos como elemento de celebración y bienvenida. Esta idea junto a obras realizadas por el arquitecto en el pasado como el Fukutake Hall para la universidad de Tokio o el 21_21 Design Sight, donde el inmueble sirve como ingreso para una institución, sirvieron de inspiración para el proyecto del Centro Roberto Garza Sada.³

Izquierda:
Imagen 5. Arco de la independencia, Monterrey.



Derecha:
Imagen 6. 21_21 Design Design Sight



La propuesta formal del CRGS ya había sido practicada por el arquitecto con anterioridad en el Museo Marítimo de Abu Dhabi datada en 2009, propuesta que nunca llegó a ser construida. Ambos edificios están planteados para desempeñar la función de puertas. El arquitecto, para los Emiratos Árabes Unidos propuso una "puerta de mar" para que cruzaran barcos; en Monterrey se propone como un acceso a la universidad.

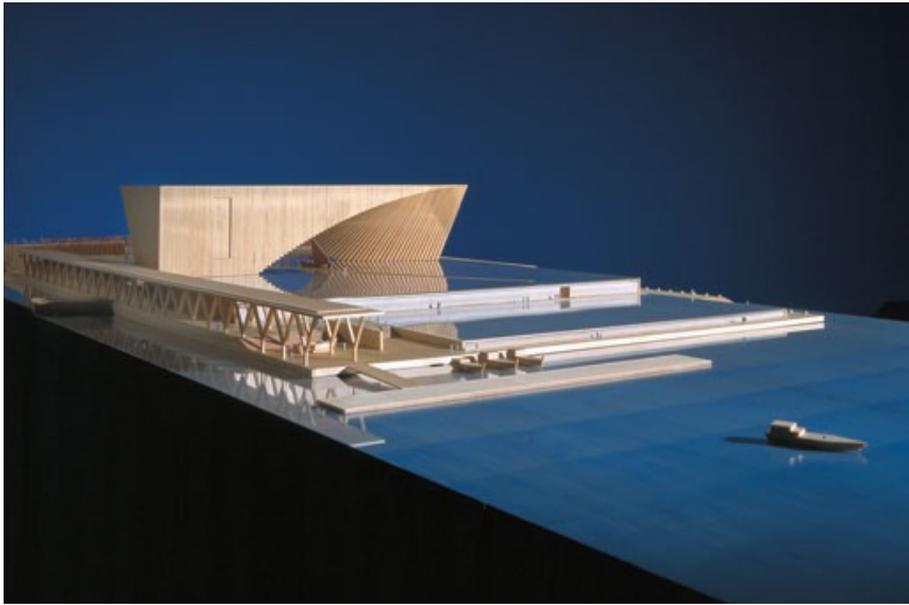


Imagen 7. Maqueta del Museo Marítimo de Abu Dhabi

El Centro Roberto Garza Sada es el Centro de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Monterrey, en Méjico. Esta Universidad está situada al oeste de la ciudad, entre la Sierra de Mitras y el Cañón de Huasteca.

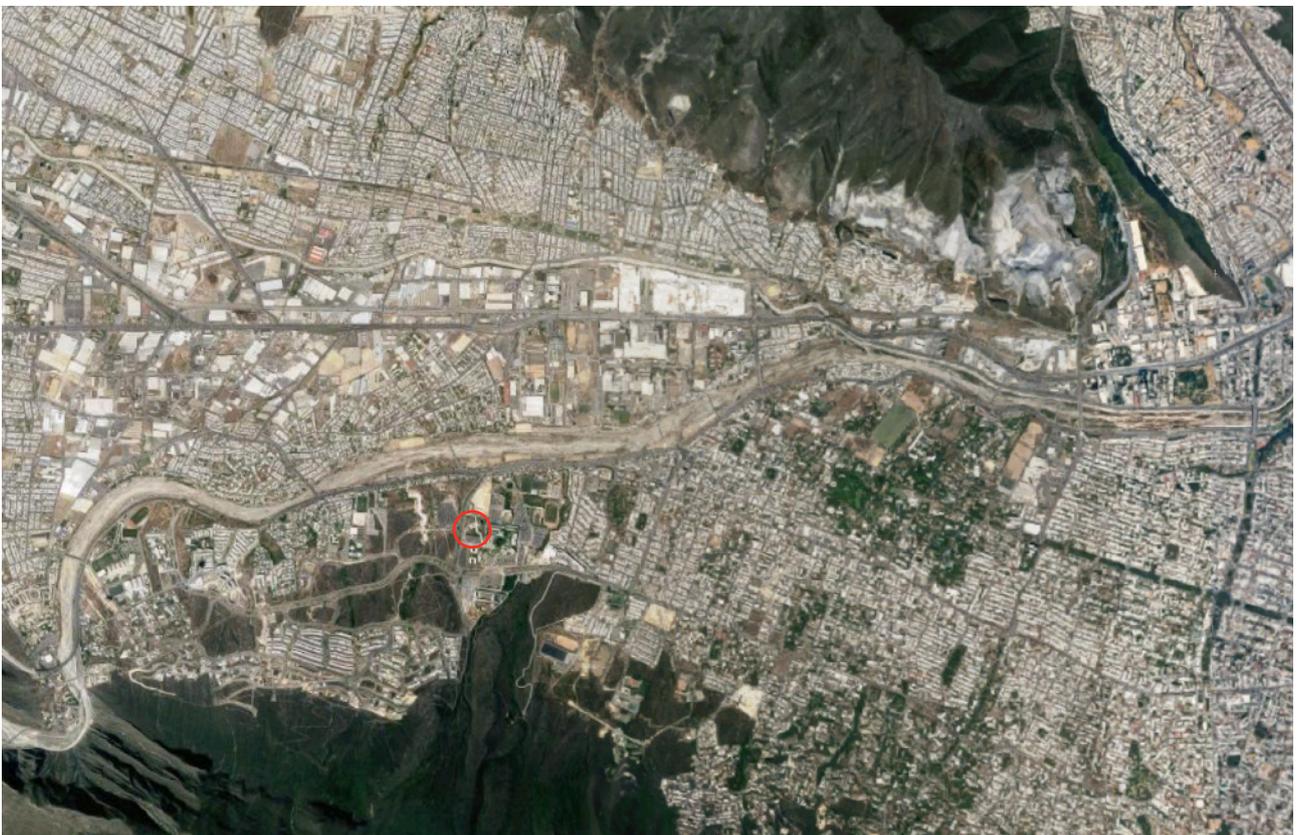


Imagen 8. Emplazamiento

El edificio de la Universidad de Monterrey, se erige como un espacio de bienvenida y a la vez como un hito arquitectónico, integrado por un volumen masivo de hormigón de perfil rectangular. La creatividad y la libertad expresiva se traducen en un cuerpo geométrico ortogonal donde el arquitecto vacía la parte inferior del edificio para darle un significado de puerta. Con este gesto, Ando busca dar la bienvenida a los alumnos, profesores y visitantes, siendo un símbolo de la Universidad de Monterrey.

La abertura resulta una superficie geométrica dando la impresión de que el hormigón se ha plegado, a esta superficie se le denomina "vela", por su relación con el velamen de las embarcaciones, la cual se vale del triángulo y de la paraboloides para lograr un escalonamiento.

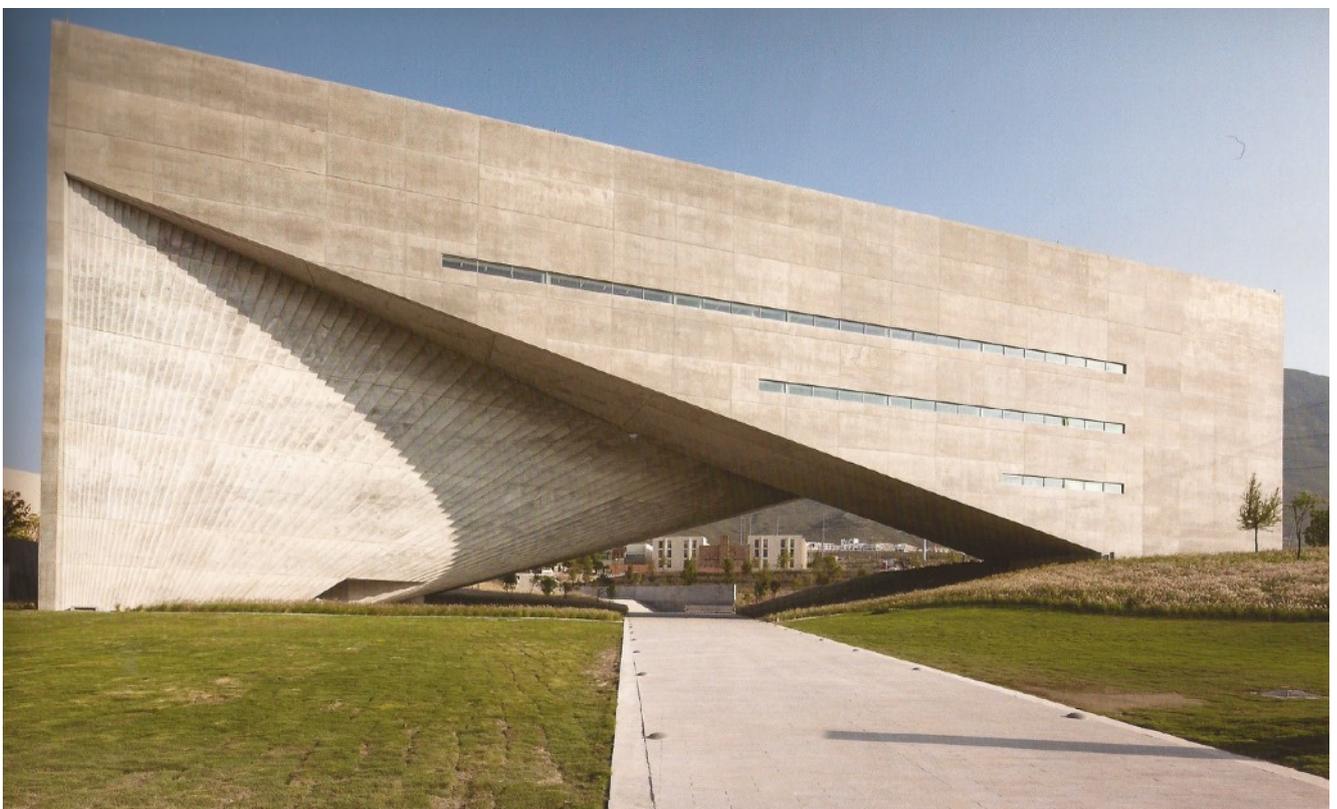


Imagen 9. Centro Roberto Garza Sada. Vista desde el exterior

La luz se vuelve parte del proyecto: la luz natural accede y se manifiesta en una relación directa con los alumnos y las diferentes actividades que se desarrollan. El arquitecto transforma el carácter masivo del exterior en un espacio vaciado para que la luz del sol penetre a través de tres grandes grandes aperturas cenitales. En las fachadas longitudinales se generan hendiduras que permiten dosificar la irradiación solar y a la vez dar luz natural a las aulas.

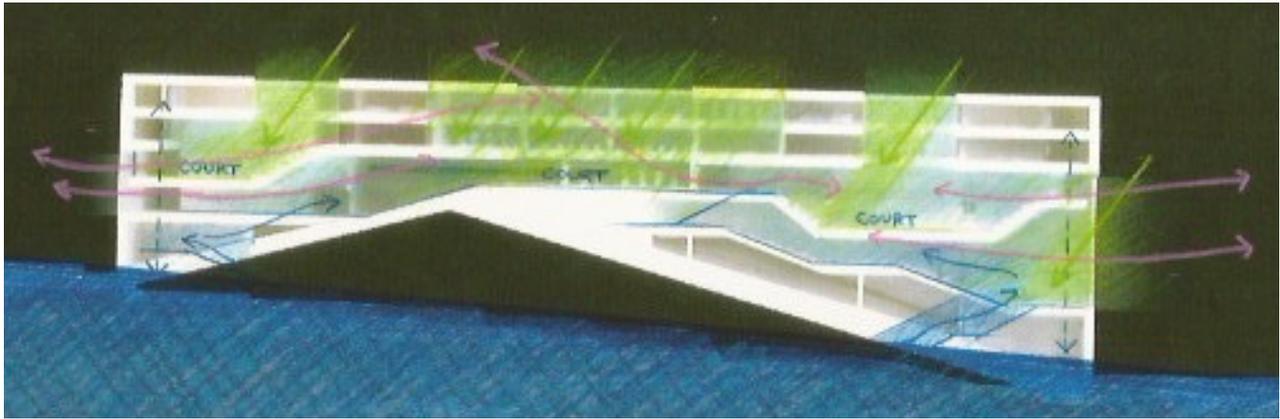


Imagen 10. Esquema de iluminación y ventilación

Su interacción con el exterior viene determinada, por una parte, en las caras oriente y poniente donde se abren grandes aperturas para tener en todo momento la presencia de las montañas y por la otra, en las caras norte y sur, los ventanales longitudinales que recorren el edificio, permiten el contacto con el exterior pero no interrumpen la concentración que se vive en el interior del edificio. Las aberturas cenitales permiten, además de la luz, que otros elementos naturales como la lluvia o el aire formen parte del edificio. Con esto retoma la idea de patio y trata el muro como si de una fachada exterior se tratase.⁴

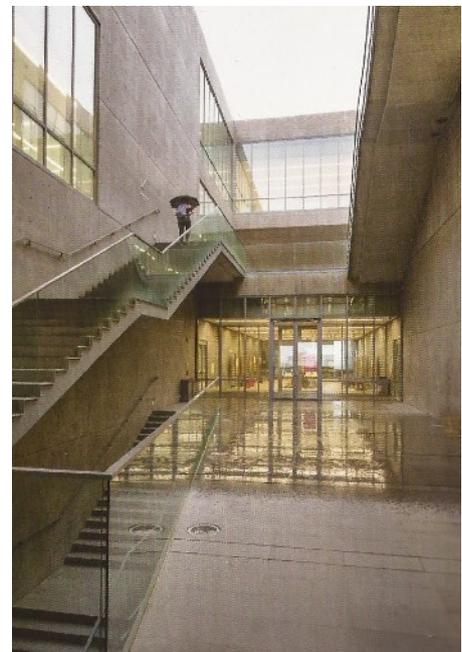


Imagen 11 y 12. Ejemplos de la relación con el exterior

La atmósfera central esta diseñada a escala humana, la cual se vale de escaleras y puentes. Las particiones de hormigón visto del edificio son elementos estructurales en un 90 por ciento, el resto son de vidrio para permitir el paso de la luz natural a través de los diferentes espacios. Los espacios interiores son más que sorprendentes, sobre todo en la forma que tomaron algunas aulas al disponerse en la parte baja del edificio, donde el suelo se levanta para formar la vela. Los anfiteatros situados en los niveles superiores, tienen acceso directo a los estudiantes, para que pudiesen ser utilizados con actividades espontáneas, sin muros circundantes o techos. Estos son espacios interiores pero están tan vinculados con el exterior, que no se percibe los muros que cierran el edificio. La mayor parte del edificio alberga talleres y laboratorios, áreas de trabajo, espacios de encuentro en todos los niveles, dos núcleos principales de circulación vertical y servicios; las áreas técnicas se encuentran la azotea y el sótano. ⁵

Los materiales de los muros son principalmente de hormigón visto, en un 80 por ciento, 10 por ciento son de tabique de paneles de yeso y el restante 10 por ciento son muros de ladrillos de hormigón acabados en yeso. Los techos son de placas de hormigón visto para la áreas de encuentro-exhibición, yeso para áreas de servicios y la chapa grecada vista en áreas de trabajo. Los suelos son de granito en áreas de exhibición-encuentro y pintura epóxica para el resto.



Imagen 13. Vista interior de uno de los talleres

PLANTAS DEL EDIFICIO

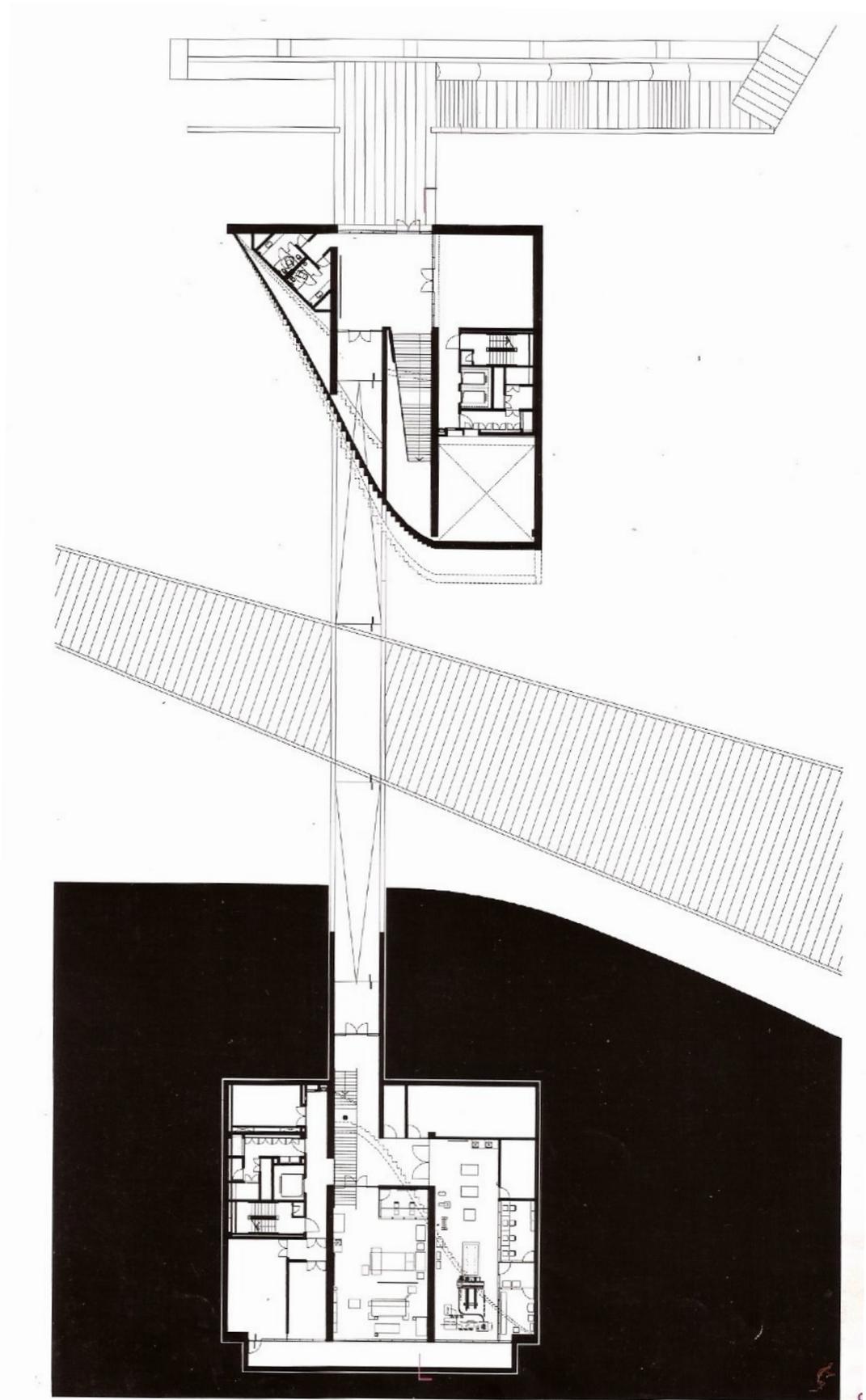


Imagen 14.PLANTA BAJA

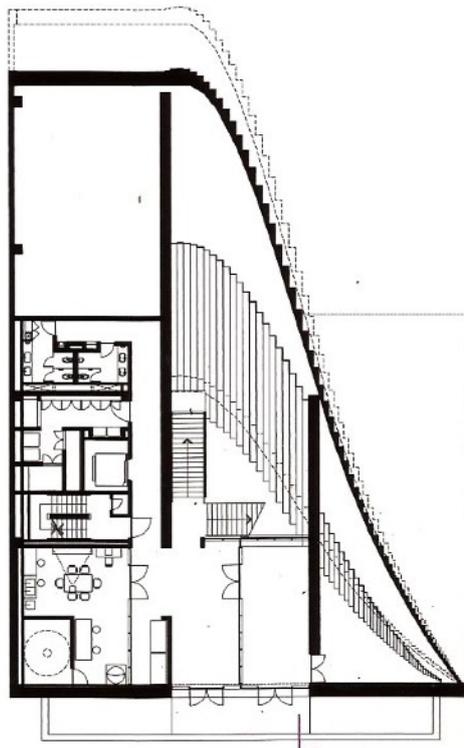
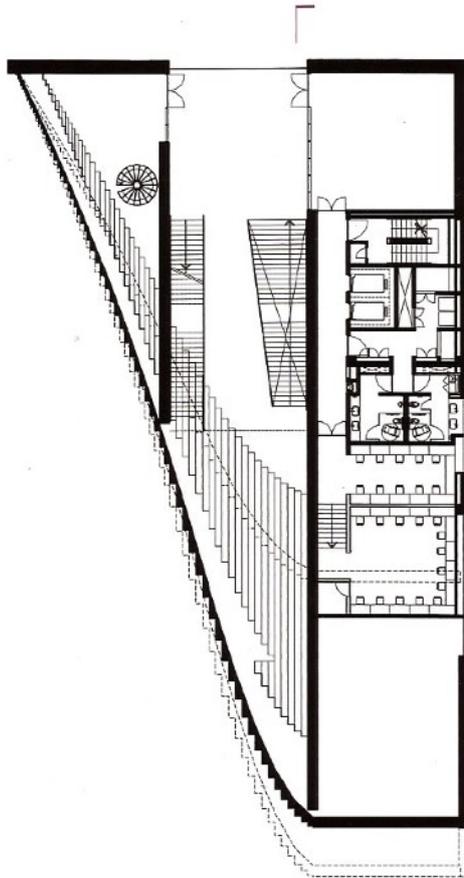


Imagen 15.PLANTA PRIMERA

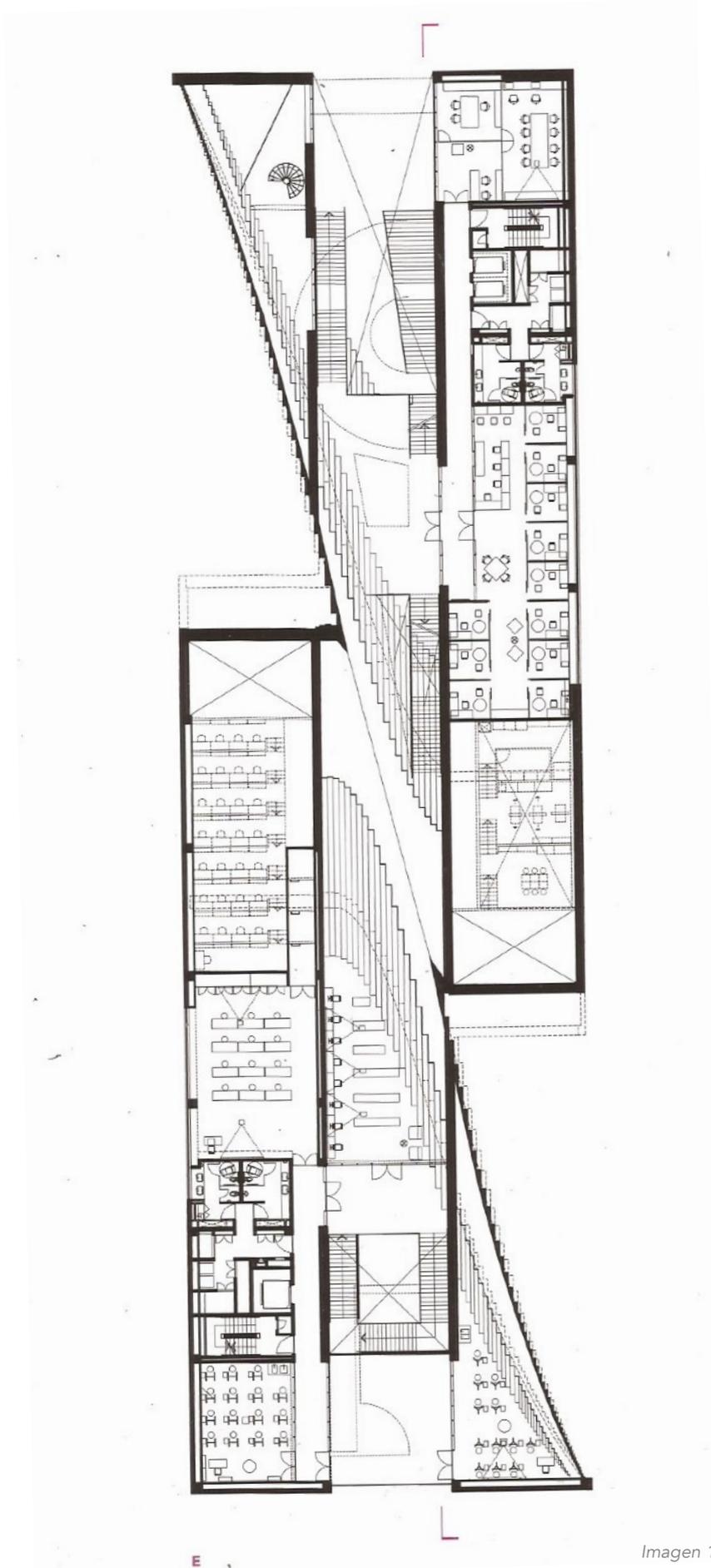


Imagen 16.PLANTA SEGUNDA

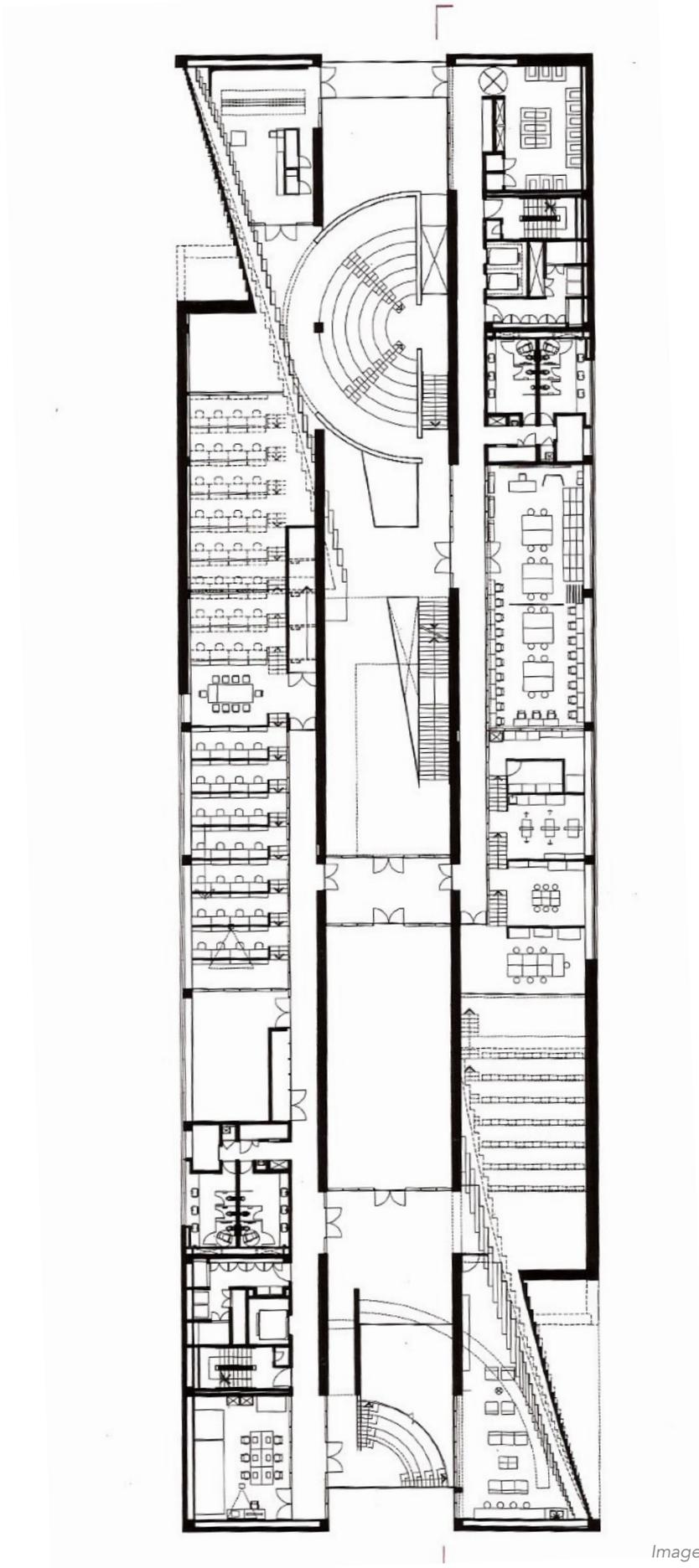


Imagen 17.PLANTA TERCERA

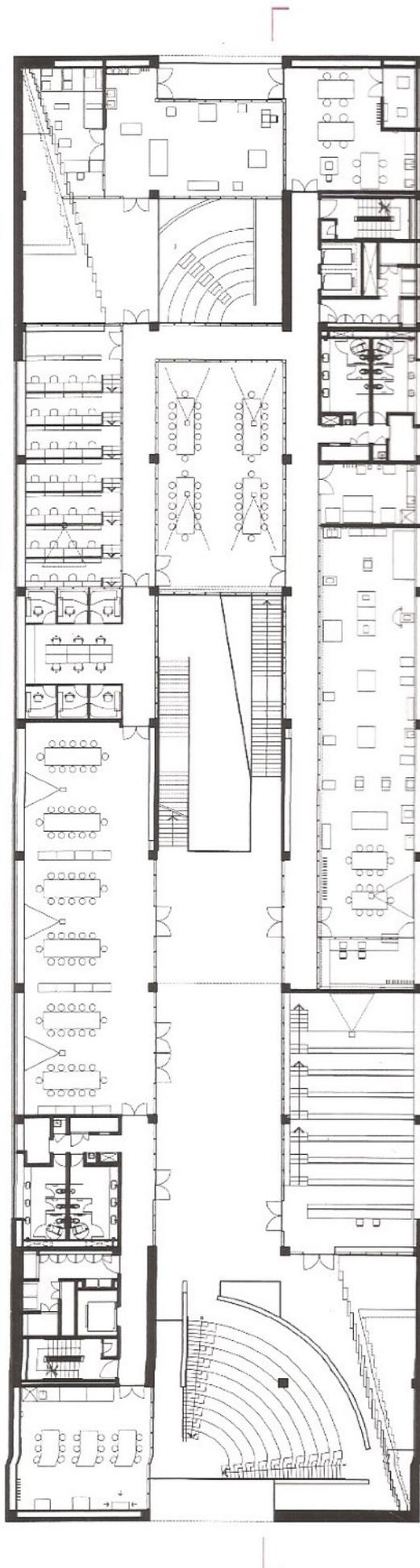


Imagen 18.PLANTA CUARTA

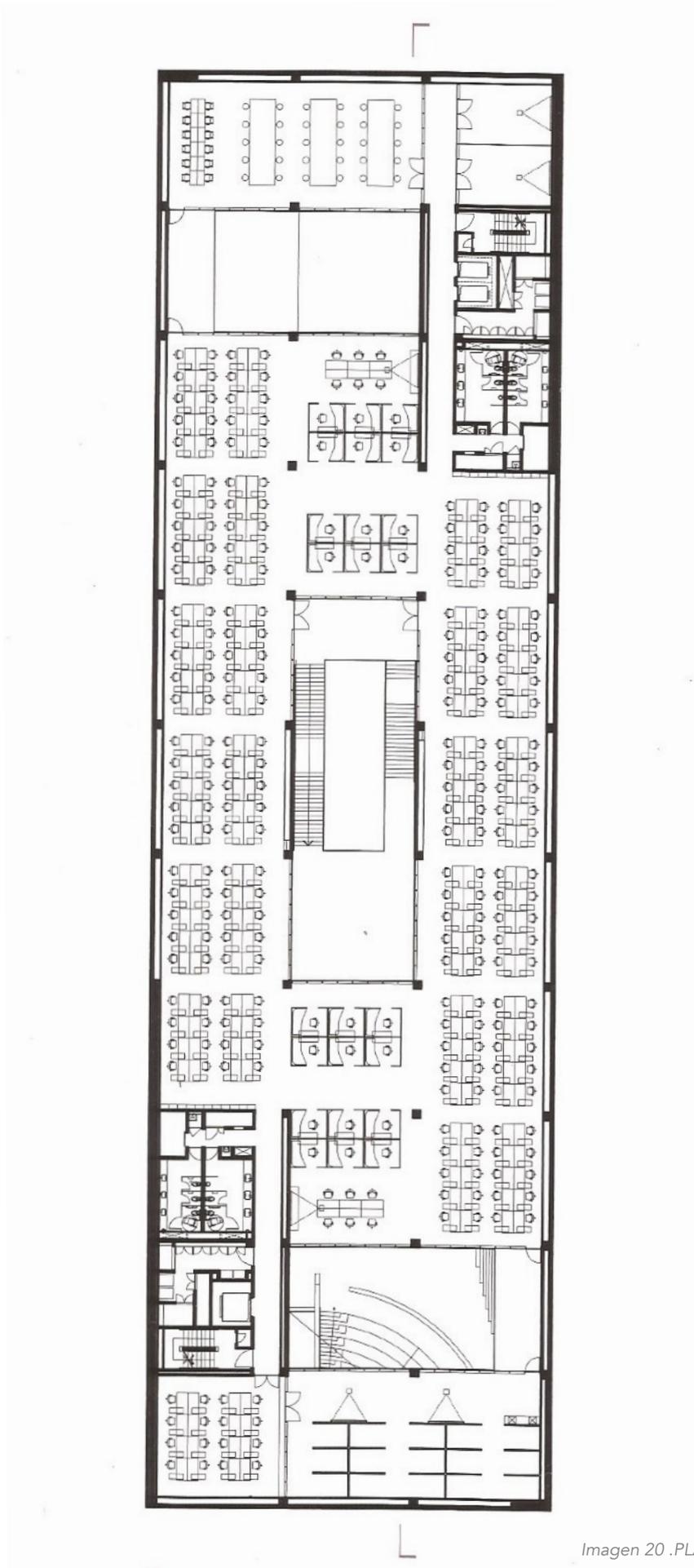
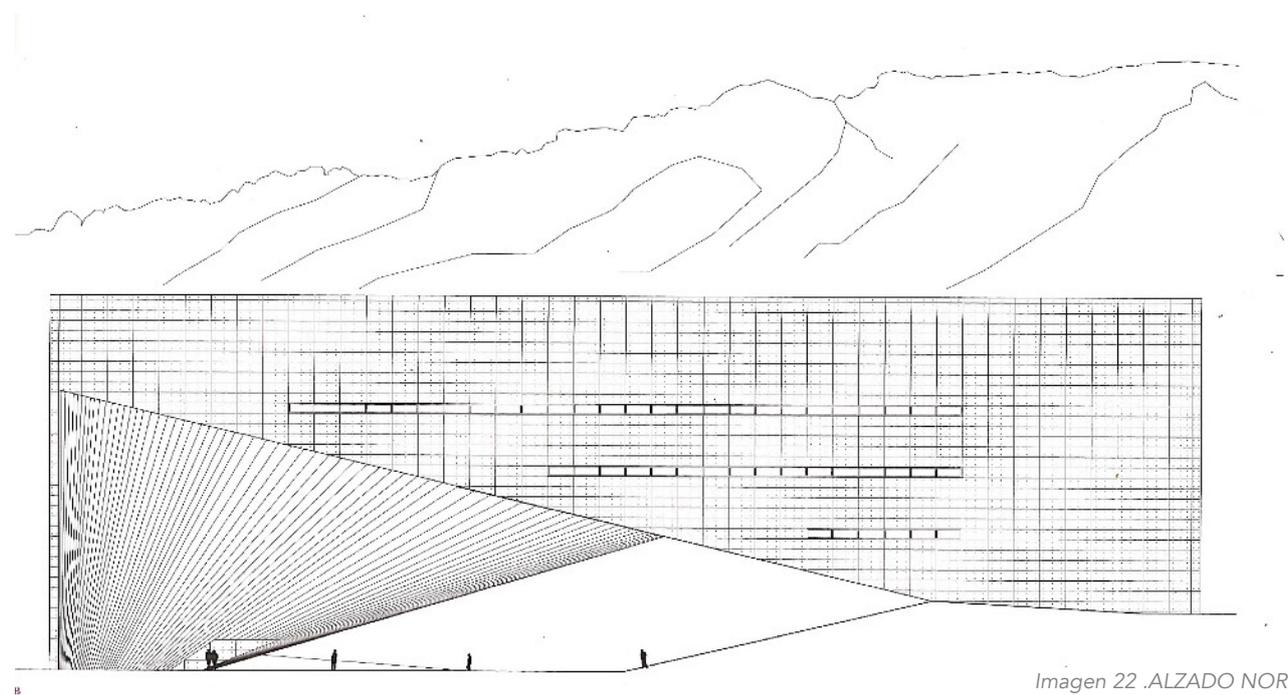
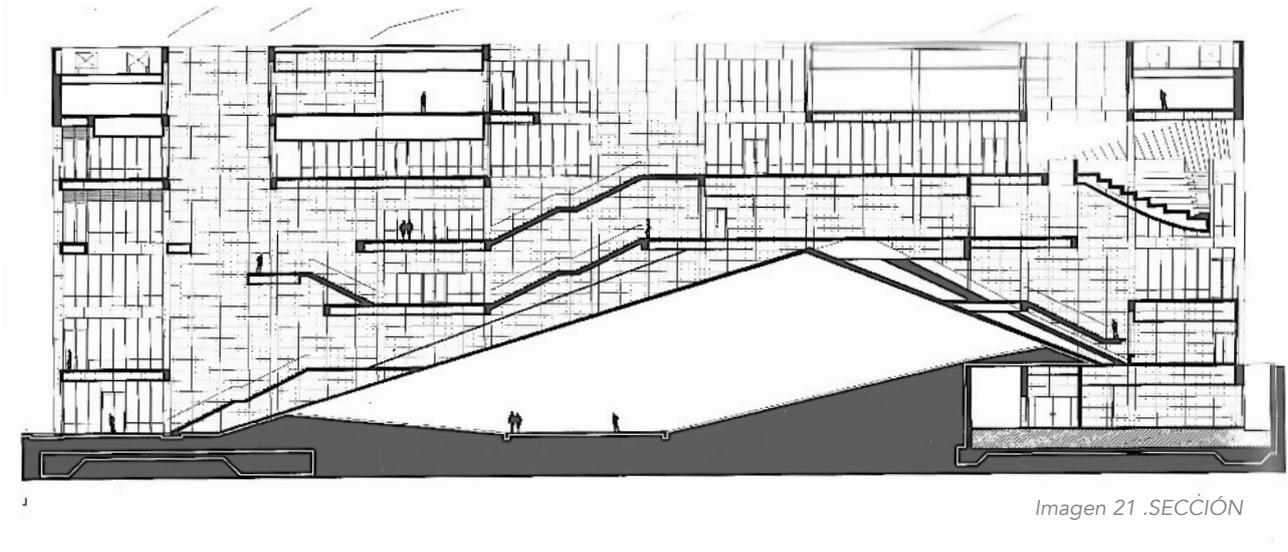


Imagen 20 .PLANTA QUINTA

SECCIÓN Y ALZADO



2.3 SISTEMA ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO Y CONSTRUCCIÓN

El criterio fundamental en la construcción del edificio fue la utilización de un módulo que se vincule con la proporción humana. Tadao Ando relaciona la escala humana con el panel triplay de 90x240 cm y con todos los elementos técnicos y constructivos. La suma de dos paneles son 180 cm que puede decirse que es la altura media de una persona. Los conos de sujeción de la cimbra de madera se distribuyen equitativamente cada 45 cm en vertical.



Imagen 23. Ejemplo de la dimensión modular

El proyecto es un prisma con base rectangular de 27 m x 99 m x 32,4 m de altura. Toma como base una retícula de 9 x 9 m. Estos ejes definen los elementos estructurales y cada nivel considera seis paneles de 90 cm, siendo la altura entre forjados de 5,4 m. ⁶

La estructura está compuesta por cuatro marcos longitudinales de acero y hormigón armado, quedando el acero en su totalidad recubierto con el hormigón. Los marcos de las fachadas longitudinales actúan como grandes ménsulas; los marcos interiores distribuyen sus cargas equitativamente en ambos lados del edificio. Estos marcos de acero y hormigón dividen el edificio en tres grandes espacios longitudinales, cuyas perforaciones tuvieron que ser estudiadas concienzudamente.

El volumen a sustraer se concibió como una serie de triángulos desviados que parten de un vértice. Se produce un movimiento controlado por una línea guía siendo una diagonal que divide la planta de esquina a esquina. En los extremos es una línea inclinada y en la parte central es un arco. El ancho de cada triángulo o costilla disminuye

5. Toda la parte estructural se ha extraído del libro CRGS, publicado por la UDEM. En este se detalla con gran amplitud la construcción del edificio

conforme se acerca al borde, para que se entienda como una curva. Esta sustracción en la parte inferior del edificio, genera que las zonas que tienen contacto con el suelo son reducidas y fueron aprovechadas para albergar principalmente la función estructural.

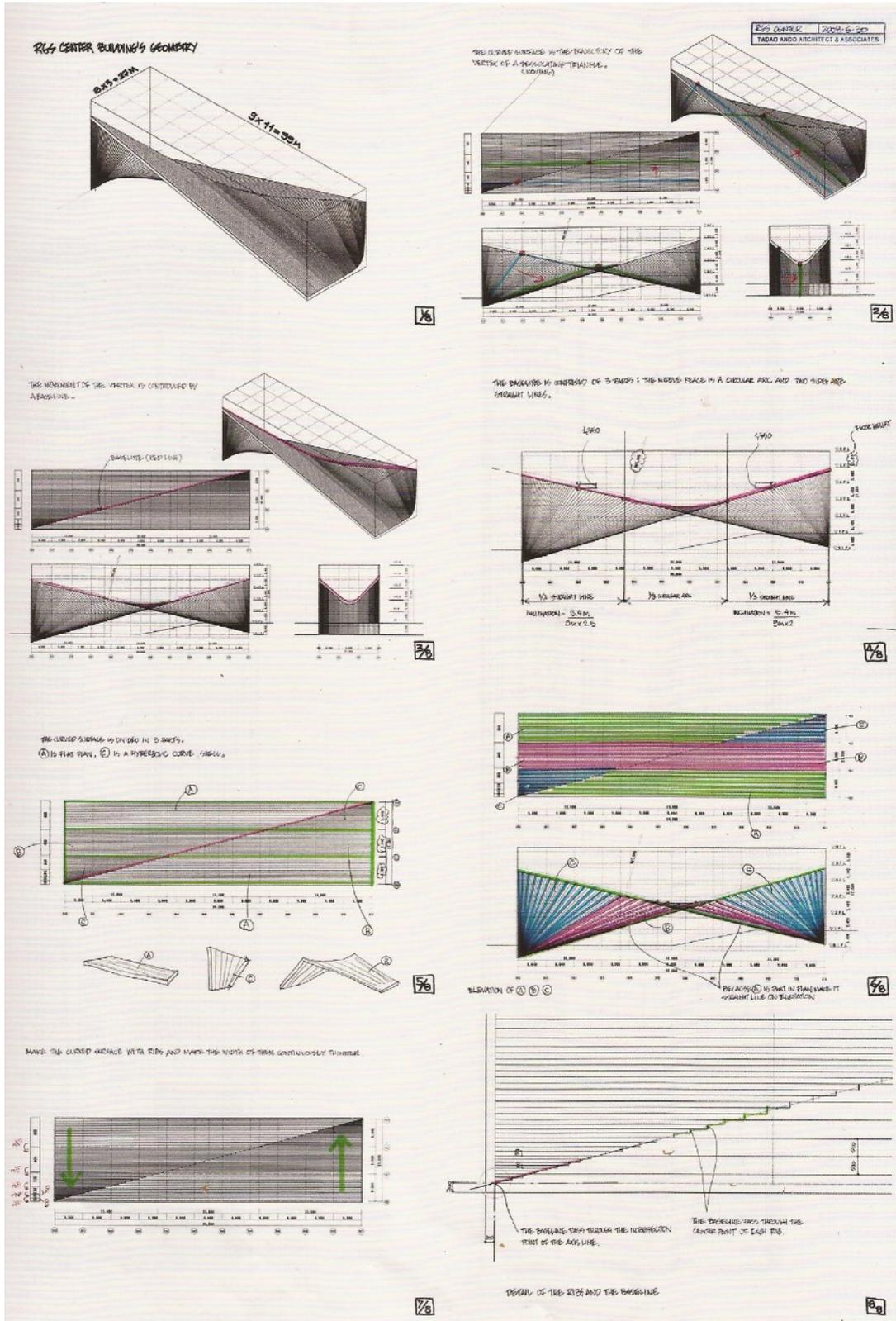


Imagen 24. Diagrama de la geometría de la vela

Es una estructura híbrida, autoportante. Esto permitió que, con un apuntalamiento, la estructura metálica se dispusiera en su sitio, para después colocar el hormigón. Ambos materiales se fusionan para dar la rigidez necesaria a la estructura.



Imagen 25. Vista desde el patio interior

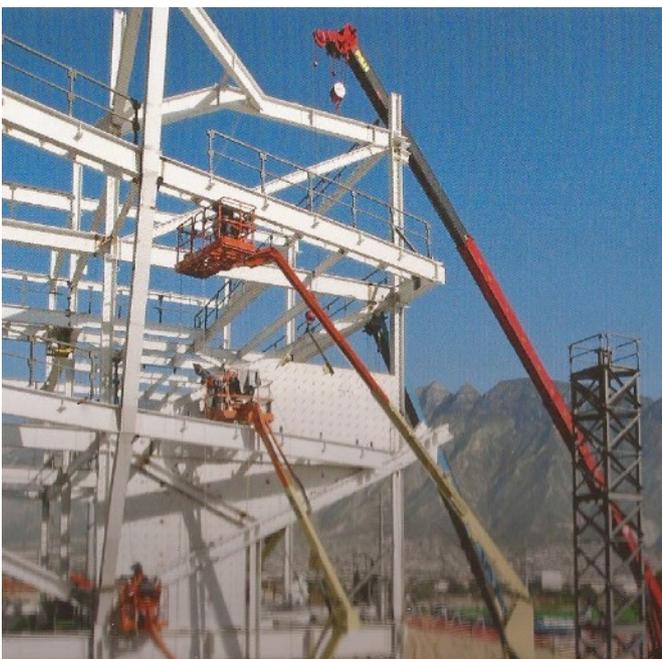
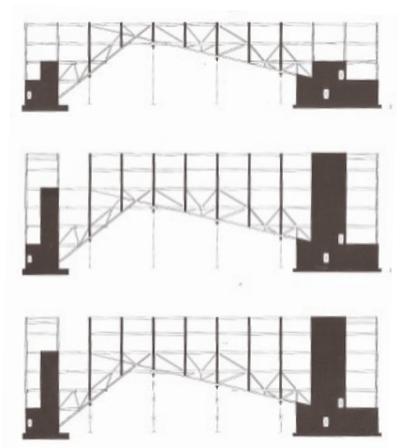
En un principio se planteó un hormigón postensado, solución que se desechó por dos razones: Por una parte, al postensar el hormigón después de su puesta se perdía el control de las grietas y fisuras. Y por otra, razones económicas, pues muchas partes de la estructura pierden su función, y solo actuaban como peso muerto. Se decidió realizarla mediante marcos de acero con apuntalamiento, cuyo resultado fue más eficiente y económico.

Los pilares tipo cuentan con una sección de 60 x 60 y los marcos estructurales presentan un espesor de 60 cm. En algunas secciones, debido a la esbeltez de los marcos, se disponen placas de acero recubiertas de hormigón para absorber los esfuerzos críticos. Las crucetas en la azotea contrarrestan la torsión que se genera por la geometría en los pilares, de sección 80 x 80 cm, que reciben el peso del edificio.

Los forjados son de chapa colaborante que trabajan unidireccionalmente, transmitiendo las cargas que reciben a las correas y estas a las vigas. Las correas tendrán una separación máxima de 3 m a eje.



Imágenes 25 y 26 .Soportes temporales



Imágenes 27 y 28. Reforzamiento con placas de acero

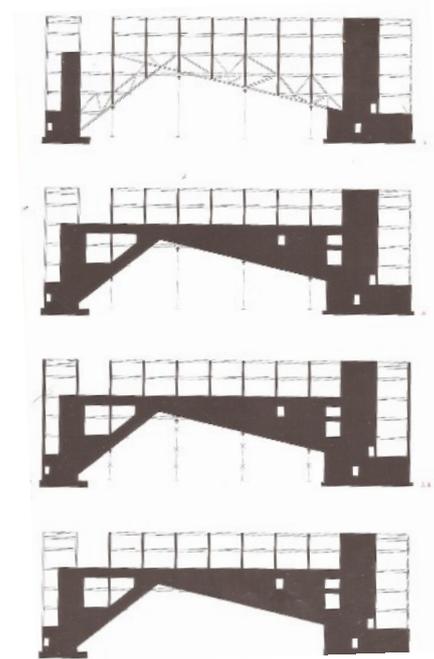


Imagen 29. Proceso de construcción de los marcos
29

En cuanto a la cimentación, el edificio cuenta con dos losas unidas entre sí por una serie de vigas estructurales y, hacia el subsuelo, con elementos de anclaje que evitan el empuje exterior de los marcos principales.

Para el encofrado se utilizó panel fenólico para dar la apariencia final a los elementos de hormigón. Se utilizó una cimbra metálica trepadora para los muros y para la vela, sistema a base de piezas prefabricadas, apuntaladas desde el terreno.

Se realizaron maquetas 1:1 para estudiar a fondo la estrategia a seguir para corroborar el sistema, ya que en muchas ocasiones los armados de acero y las vigas no dejaban espacio suficiente de maniobra para los operarios.

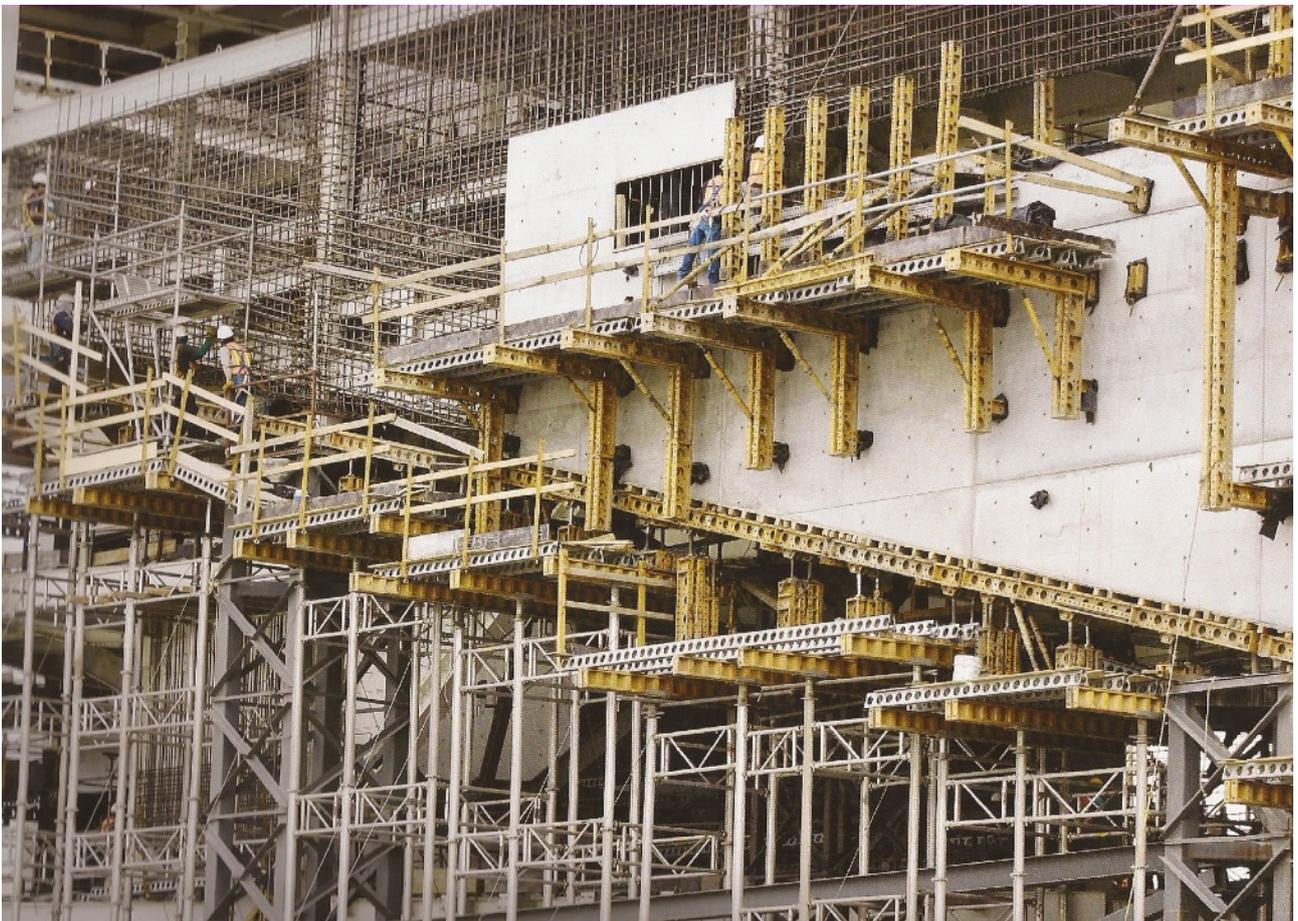
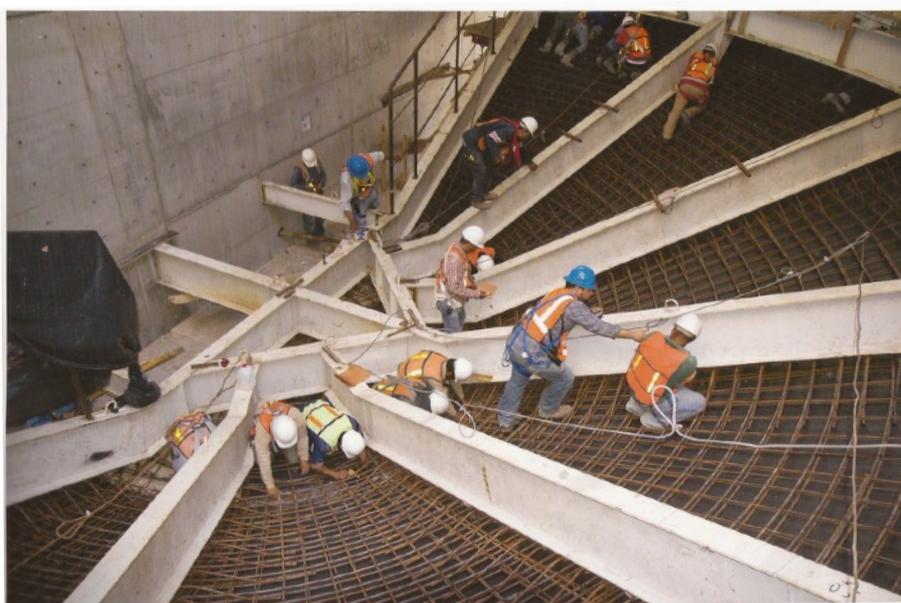


Imagen 30. Función estructural de las fachadas



Imágenes 31, 32 y 33.

Proceso de construcción de anfiteatro oriente.

PROCESO CONSTRUCTIVO



Movimientos de tierras y cimentación



Montaje de la estructura de acero en los extremos del edificio. Desde la planta baja hasta la azotea y la posterior construcción del hormigón en los marcos hasta el nivel 02.



Se unen ambos extremos con la estructura de acero, con la ayuda de los apuntalamientos. Posteriormente se inicia la construcción del hormigón en los extremos



Montaje de la estructura de acero en losas de pisos, crucetas, contravientos y marcos estructurales.

Construcción del hormigón de los extremos hasta la planta última e inicio de la construcción de los muros de concreto en los marcos longitudinales.



Se elimina los apoyos para que el edificio tome su posición final. Construcción de las losas de hormigón y muros de hormigón visto. Se coloca otra vez los apuntalamientos hasta que el hormigón coja la resistencia adecuada.



Construcción de la vela con elementos prefabricados de hormigón apuntaladas desde el terreno.

Imagen 34, 35, 36,37,38 y 39 .Proceso constructivo del edificio

3. MODELO DE CÁLCULO

La modelización de la estructura se ha realizado con Autocad, utilizando las entidades LÍNEA Y 3DCARA.

En elementos lineales como vigas, pilares o correas, se utiliza la entidad LÍNEA. Estas líneas simbolizan el eje de la barra. Todos los elementos lineales se han realizado con conexión a vértices de otras barras, es decir no como un elemento continuo. Estas líneas se importan a SAP2000 como *frames*.

En elementos superficiales como los forjados o muros, se utiliza la entidad 3DCARA, cuyo plano simboliza el plano medio del elemento finito. Estas entidades siempre deben estar conectadas en el vértice de otras 3DCARA o al vértice de una línea. Las 3DCARA se importan a SAP2000 como *shells*.

Datos sobre el modelo de la estructura:

- Número de líneas en Autocad 1466
- Número de 3DCara en Autocad 5793

3.1 GEOMETRÍA

La modelización de la estructura se ha basado en un prisma de base rectangular de 27 x 99 x 32,4 m, dividiendo este prisma en 11 partes de 9 m en el sentido longitudinal y 3 partes de 9 m en el sentido transversal, situando en los ejes, los pilares.

Cada forjado se sitúan a una distancia entre ejes de 5,4 m de altura y las correas tienen una separación máxima de 3 m, salvo en ocasiones especiales que se sitúan a menor distancia.

El modelo de la vela se ha efectuado como un paraboloides, los triángulos antes mencionados se unen en su vértice a los pilares de los extremos y el otro vértice sigue una línea en diagonal, formando así el movimiento de la vela.

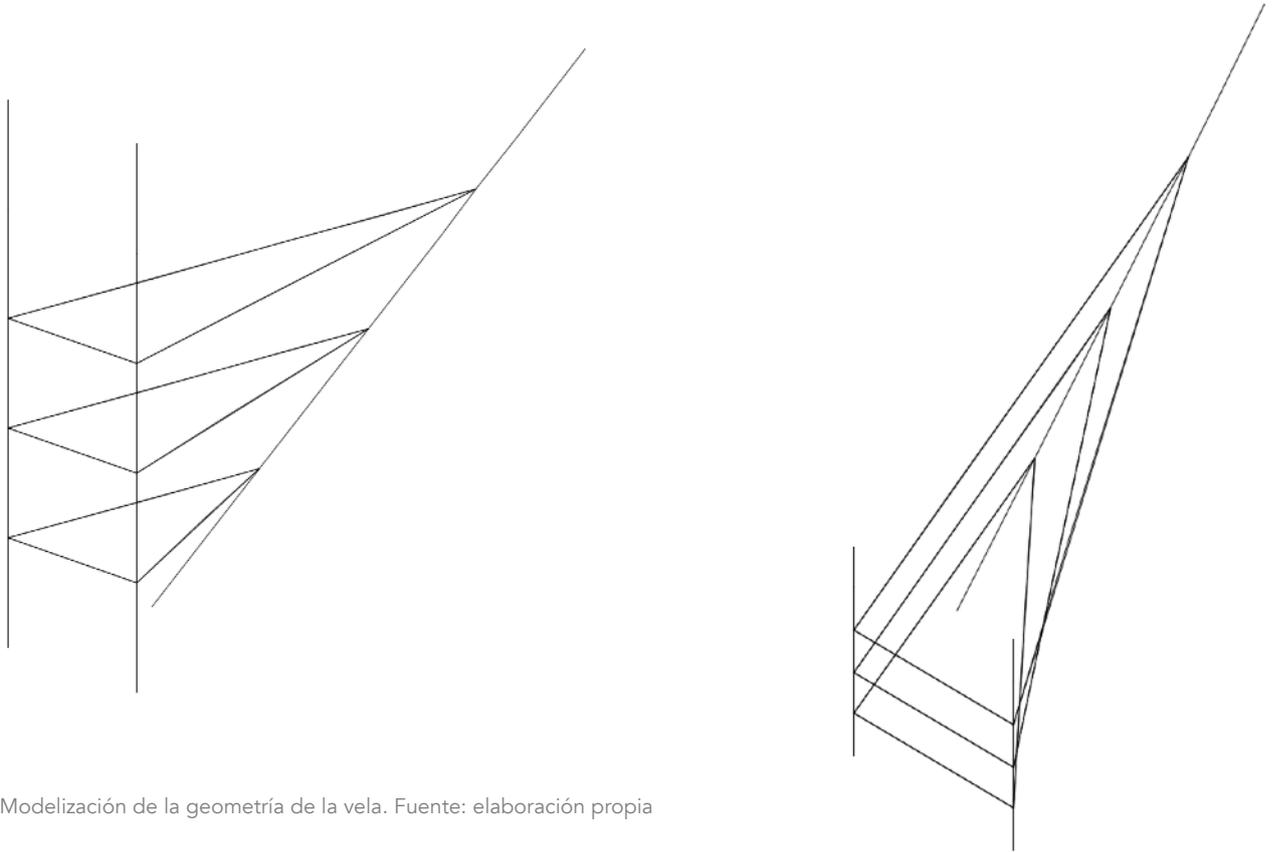


Figura 1 : Modelización de la geometría de la vela. Fuente: elaboración propia

3.2 SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS

En el modelo de la estructura del edificio se han considerado algunas simplificaciones, que se mencionan a continuación.

Las placas de acero que sirven como refuerzo en las zonas de los marcos más desfavorables no se han modelizado, pues queremos saber el comportamiento de la estructura y se ha descartado. Suponiendo que con el hormigón y el acero sería suficiente.

Debido a la falta de información en algunas zonas del edificio no se han contemplado o se ha interpretado la información en algunas diagonales o crucetas de refuerzo.

La Vela se ha modelizado como 3DCara unida a los forjados para que el propio programa tenga en cuenta el peso y a la vez se puedan poner cargas de viento en fachada.

Para la modelización de los forjados de chapa grecada colaborante se ha realizado una equivalencia a Forjado-losa según la tabla excel. La cual aporta el área y la inercia equivalente, así como la rigidez.

EQUIVALENCIA CHAPA GRECADA - LOSA (MATERIAL HORMIGON)			
CHAPA GRECADA (7,50+5,00)x32,00	ALTO GRECA	7,50	cm
	ALTO CAPA COMPRESION	5,00	cm
	INTEREJE GRECA	32,00	cm
	ANCHO MEDIO GRECA	12,00	cm
	CENTRO DE GRAVEDAD	7,75	cm
	INERCIA	3005,21	cm ⁴
	INERCIA POR METRO	9391,28	cm ⁴
LOSA MACIZA	AREA	250,00	cm ²
	AREA POR METRO	781,25	cm ²
PROPERTY MODIFIER	MEMBRANE (AREA)	0,0781	m
	BENDING (INERCIA)	0,1041	m
PROPERTY MODIFIER	FLEXIÓN SECUNDARIA (M22, V23)	0,11092	
	AXIL SECUNDARIO (F22)	0,40000	

Figura 2: Equivalencia chapa grecada para la modelización en SAP2000. Fuente: Elaboración propia

3.3 MATERIALES Y SECCIONES UTILIZADOS

Como aproximación a la realidad de la estructura, se intentó contactar con la empresa suministradora del acero, pero sin éxito. Posteriormente con la Universidad de Monterrey, donde me facilitaron el correo de un ingeniero que participo en la obra. No pudo decirme a ciencia cierta el material utilizado para el acero, al igual que las secciones solo me dijo que eran del tipo W en E.E.U.U. Estos perfiles son equivalentes a los IPE o HEB en España. Sí me facilito el hormigón utilizado, siendo HA-45. El canto de los muros y fachadas de hormigón es de 60 cm.

Con estos datos y las imágenes se procede a interpretar los perfiles utilizados en el proyecto. Por tanto se adjudicarán unos perfiles estimativos, para proceder a la comprobación y análisis; este modelo se irá modificando hasta alcanzar un modelo óptimo.

Materiales

- Acero S-275 para perfiles
- HA-45 para hormigón
- B-500-S para barras corrugadas

Secciones

- Para pilares HEB-500
- Vigas y zunchos perimetrales IPE-550
- Brocales IPE-300
- Correas IPE-200
- Diagonales 2L1 180.20
- Sección de los muros y fachadas de hormigón 60 cm

3.4 CONDICIONES DE ENLACE

Las condiciones de enlace de la estructura con el exterior, para los apoyos, tanto de los pilares como de los muros se han considerado empotradas.

Las barras se han considerado como rígidamente unidas entre sí, salvo en las barras de las diagonales, que por su naturaleza, se consideran articuladas, ya que se disponen para transmitir únicamente esfuerzos axiales

3.5 CARGAS APLICADAS, HIPÓTESIS Y COMBINACIONES

3.4.1 EVALUACIÓN DE CARGAS E HIPOTESIS BÁSICAS

CARGAS PERMANENTES (CMP)

Peso propio de los elementos estructurales

El peso propio de la estructura es una acción que el SAP2000 ya la tiene en cuenta asignando los materiales y las secciones.

Peso propio de los elementos no estructurales

Pavimentos	suelo de granito	1 KN/m ²
	pintura epóxica	0,2 KN/m ²
Falso techo		0,25 KN/m ²
Instalaciones		0,25 KN/m ²
Tabiquería		1 KN/m ²
Totales :		
Zonas con suelo de granito		2,5 KN/m ²
Zonas con suelo de pintura epóxica		1,7 KN/m ²

CARGAS VARIABLES

Sobrecarga de uso (SCU)

Zona de paso		5 KN/m ²
Zona de uso		3 KN/m ²
Cubierta accesible para tareas de mantenimiento con inclinación menor a 20 °		1 KN/m ²

Sobrecarga de viento (SCV)

Para la sobrecarga de viento se ha procedido como si de un edificio en altura se tratase debido a la complejidad de su forma, es decir, como cargas variables en fachada. Para la obtención de los datos se utilizará el CFEV-08, norma de diseño de obras civiles por viento en Méjico. Los cálculos se realizarán según lo establecido en la norma española CTE DB SE-AE.

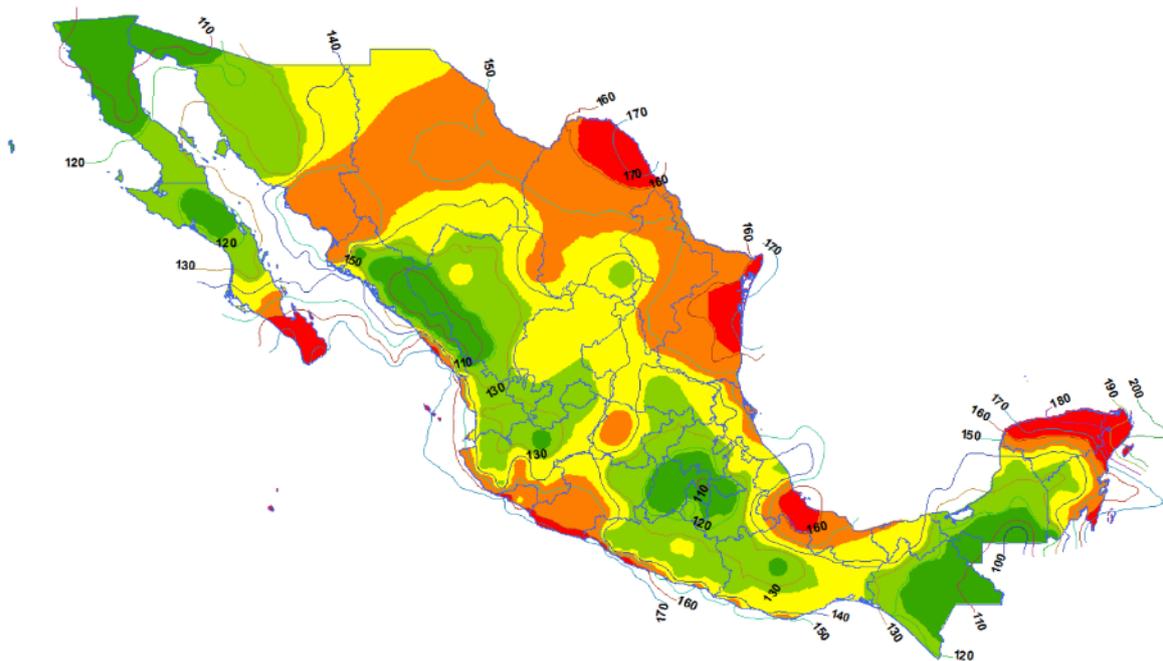


Figura 3: Mapa de la velocidad máxima del viento para un periodo de retorno de 50 años. Fuente: CFEV-08

En la ciudad de Monterrey la velocidad máxima del viento es de 154 Km/h, con este dato se extrae del CFEV-08 que la velocidad básica del viento (V_b) es de 37,68 m/s. El dato obtenido se considera de gran importancia ya que está situado en una zona con peligrosidad de vientos huracanados.

Por tanto la presión dinámica del viento es:

$$q_b = 0,5 \cdot 1,25 \text{ (Kg/m}^3\text{)} \cdot 37,68^2 = 0,887 \text{ KN/ m}^2$$

En los edificios de pequeño tamaño:

$$c_p = 0,7$$

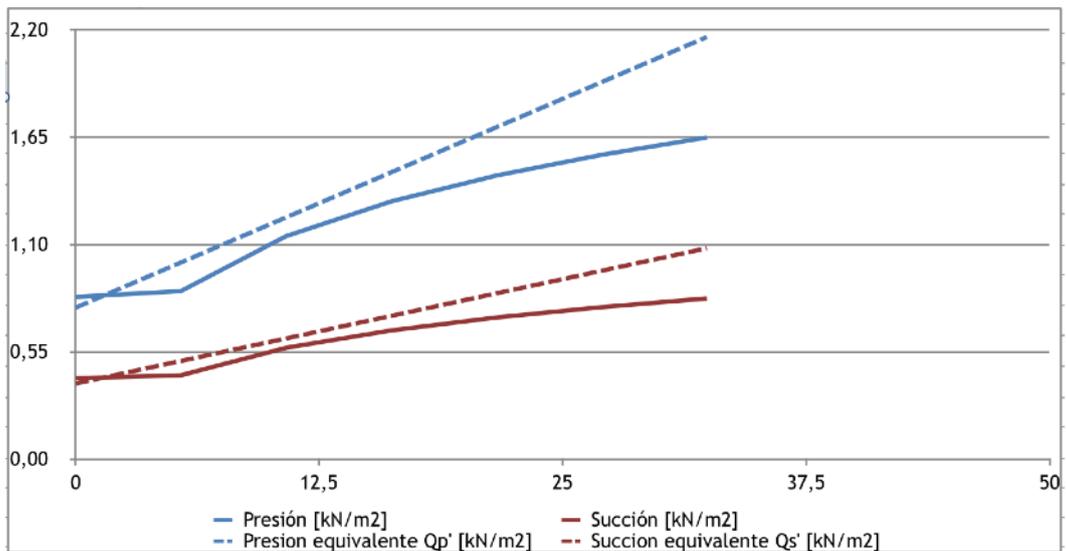
$$c_s = 0,35$$

Al situarse en una zona urbana en general, el grado de aspereza es de tipo IV.

VIENTO EN EDIFICIOS EN ALTURA SEGÚN CTE

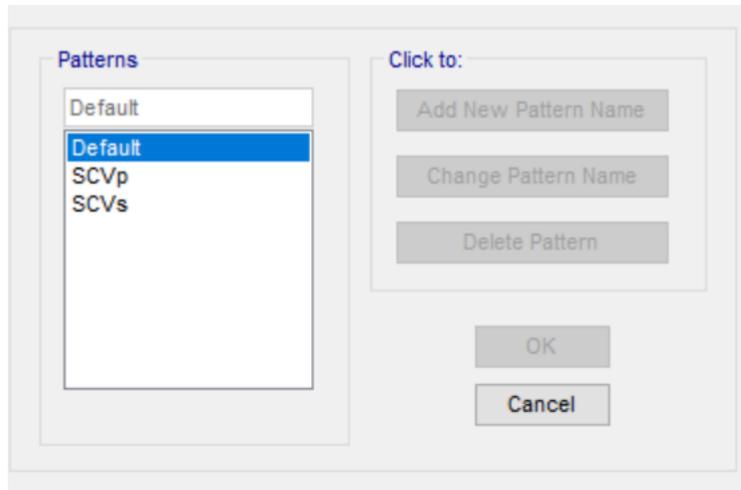
Cota del último forjado	z	32,40	[m]
Número de plantas	N	6,00	[]
Presión básica	qb	0,89	[kN/m ²]
Coefficiente de presión	cp	0,70	[]
Coefficiente de succión	cs	0,35	[]
Grado de aspereza del entorno		IV	
Parámetros del entorno	k	0,220	
Parámetros del entorno	L	0,300	[m]
Parámetros del entorno	Z	5,000	[m]
Cortante/m ² total presiones	Qp	8,82	[kN/m ²]
Momento/m ² total presiones	Mp	165,39	[kNm/m ²]
Presión de viento equivalente en base	qp0	0,78	[kN/m ²]
Presión de viento equivalente en cabeza	qpz	2,16	[kN/m ²]
Cortante/m ² total succiones	Qs	4,41	[kN/m ²]
Momento/m ² total succiones	Ms	82,70	[kNm/m ²]
Succión de viento equivalente en base	qs0	0,39	[kN/m ²]
Succión de viento equivalente en cabeza	qsZ	1,08	[kN/m ²]

presion	Dsap	0,78
	Csap	0,0427744
succion	Dsap	0,39
	Csap	0,0213872

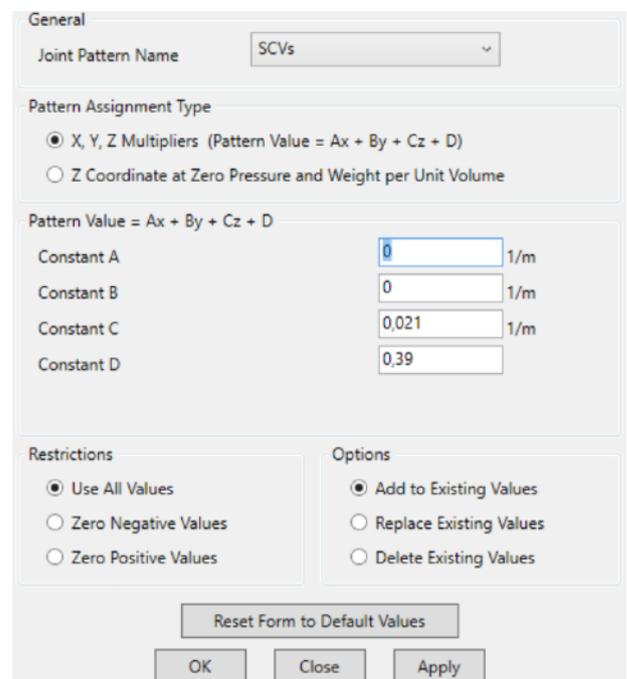
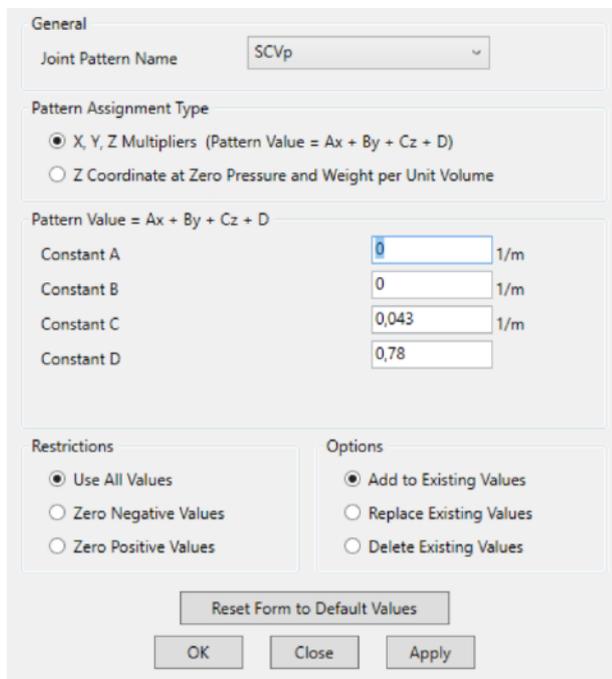


IMPORTACIÓN DE LOS DATOS AL SAP2000

1. Define - Joint Patterns



2. Assign-Joint Patterns



3. Assign- Area Loads-Surface Pressure Loads

Load Pattern

Load Pattern

Loaded Face

Top

Bottom

Edge

Edge Face Number

Pressure

By Element

Pressure kN/m²

By Joint Pattern

Joint Pattern

Multiplier

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

- Asignación de carga variable en la fachada

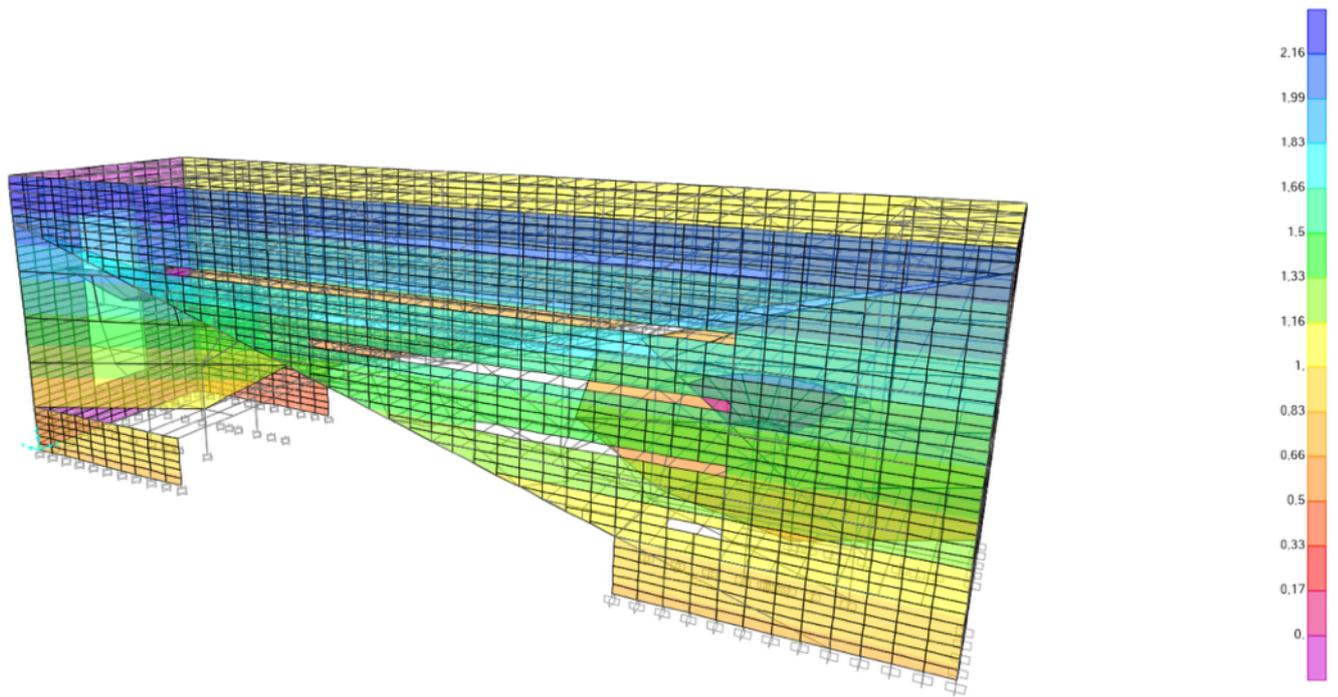


Figura 4: Cargas variables aplicadas de presión en la fachada Fuente: Elaboración propia

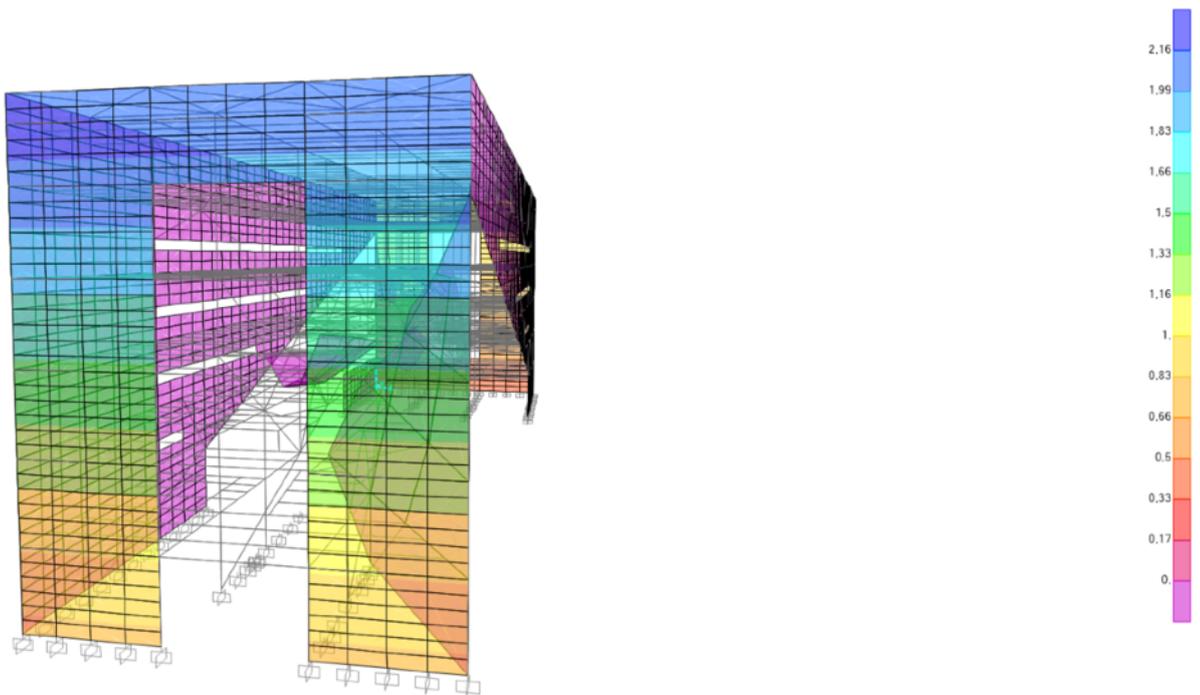


Figura 5 : Cargas variables aplicadas de presión en la fachada Fuente: Elaboración propia

Sobrecarga de nieve (SCN)

La norma local (CFE-OC 08) establece que no se considerará la sobrecarga de nieve en la mayoría de los distritos, salvo en aquellos lugares con peligrosidad.

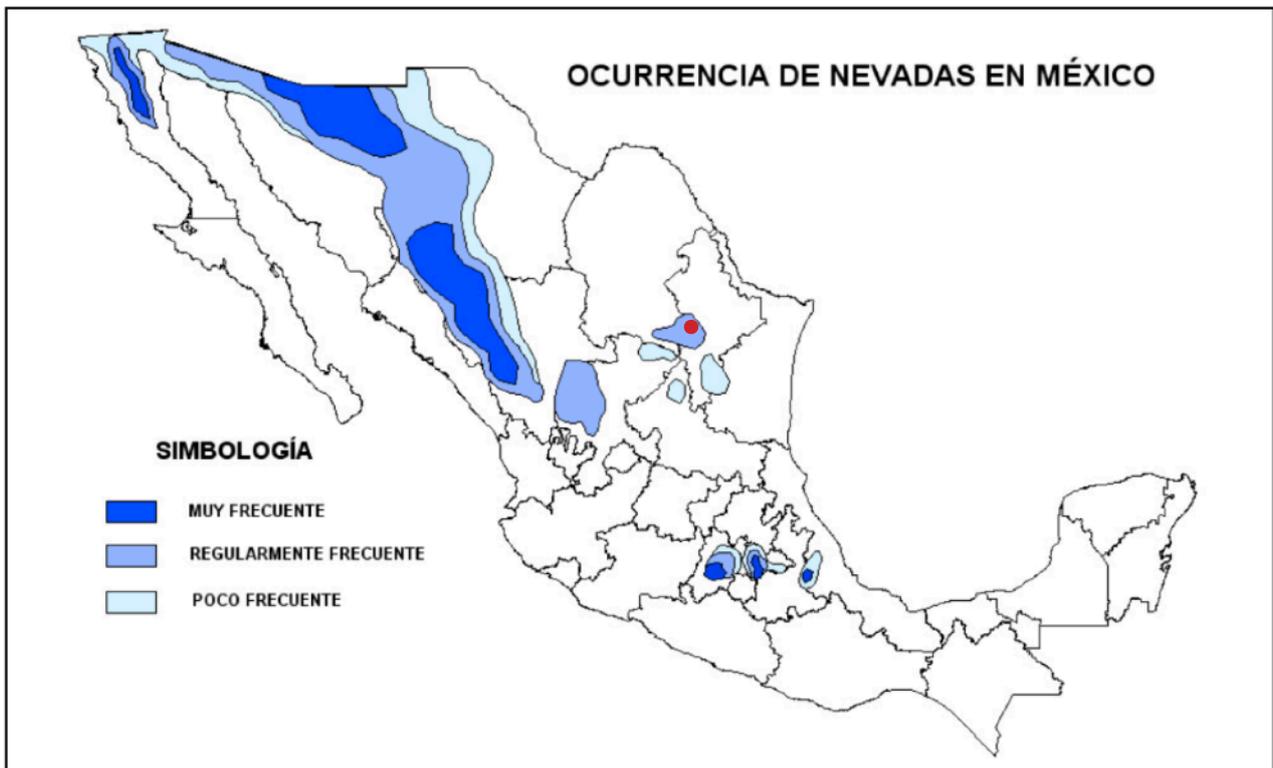


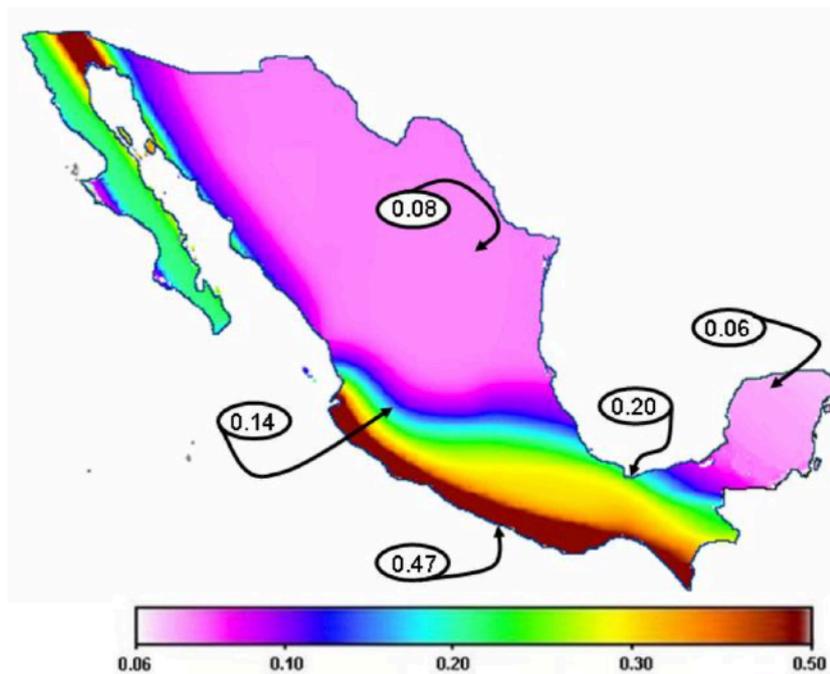
Figura 6 : Mapa de ocurrencia de nevadas en Méjico. Fuente: Área de Riesgos Hidrometeorológicos del CENAPRED

Monterrey está en una situación geografica donde sí existe riesgo de nevada, la norma establece que para este tipo de localizaciones se establezca un valor de 0,25 KN/m².

Sobrecarga de sismo SCSis

La sobrecarga de sismo se calculará según la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02). Los datos se obtendrán de la Norma de diseño de obras civiles por sismo en Méjico (CFES-08).

La peligrosidad sísmica se define por medio la relación entre la gravedad, la aceleración sísmica básica a_b y el coeficiente de contribución K , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de



cada punto.

Los datos obtenidos de la norma CFES-08 son:

$$\text{aceleración sísmica básica } (a_b) = 0,08 \text{ g}$$

$$\text{coeficiente de contribución } (K) = 1$$

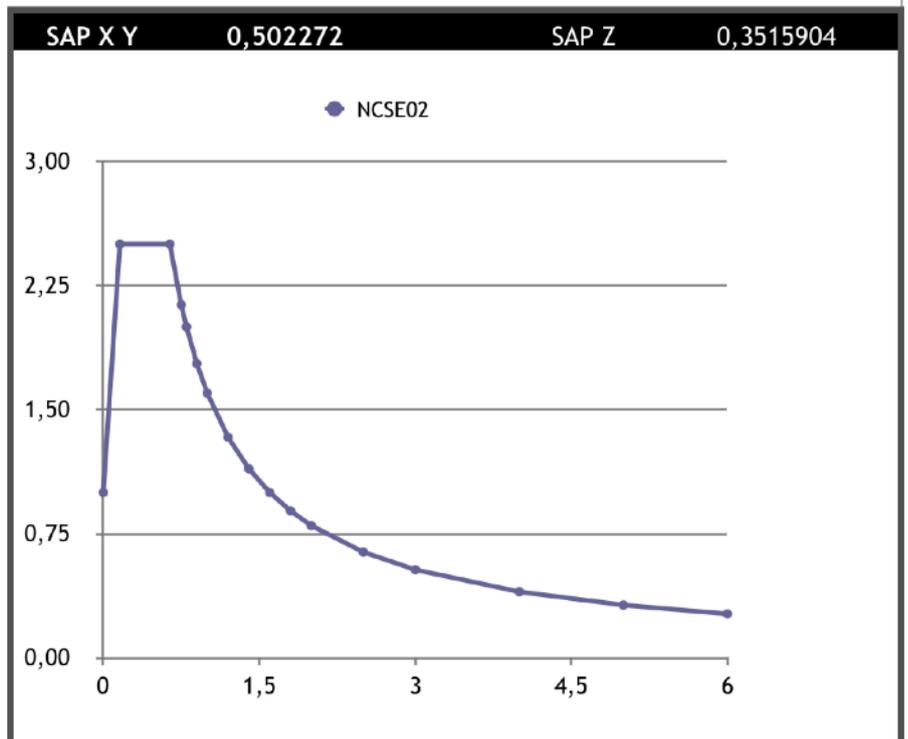
El tipo de terreno es granular de compacidad media, por tanto:

$$\text{Coeficiente } C = 1,6$$

Siguiendo la Norma NCSE-02 y mediante la utilización de una tabla excel, se obtiene el espectro de respuesta elástica del edificio.

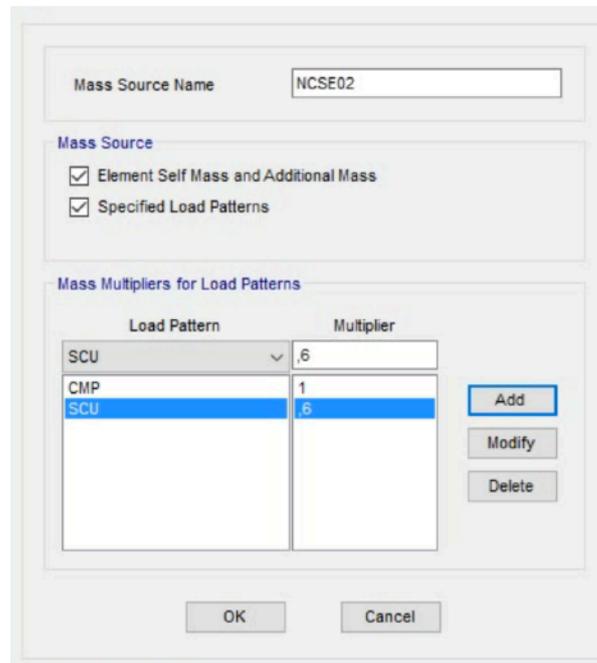
K	1	a_b/g	0,08	μ	2
C	1,6	ρ	1	Ω	5
T_A	0,16	S	1,28	ν	1
T_B	0,64	a_c/g	0,1024	B	0,5

T	$\alpha(T)$
0	1,00
0,16	2,50
0,64	2,50
0,75	2,13
0,8	2,00
0,9	1,78
1	1,60
1,2	1,33
1,4	1,14
1,6	1,00
1,8	0,89
2	0,80
2,5	0,64
3	0,53
4	0,40
5	0,32
6	0,27

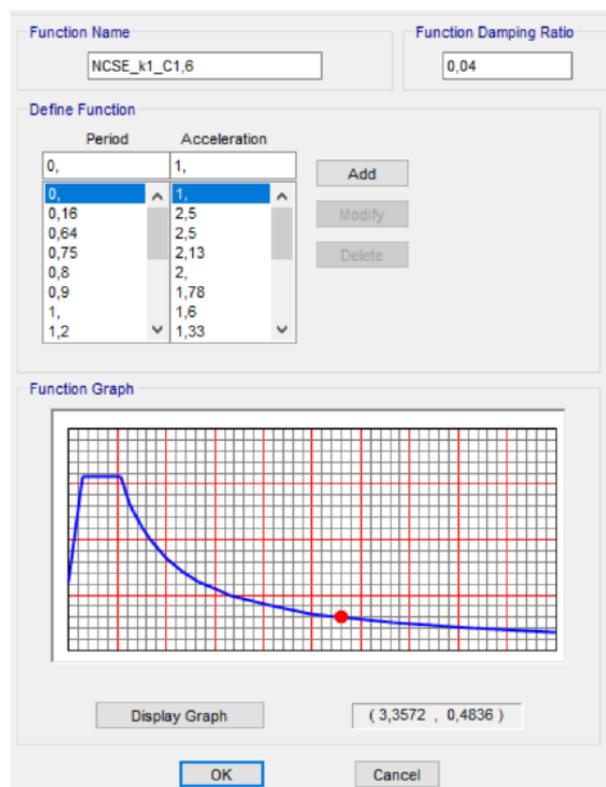


IMPORTACIÓN DE LOS DATOS AL SAP2000

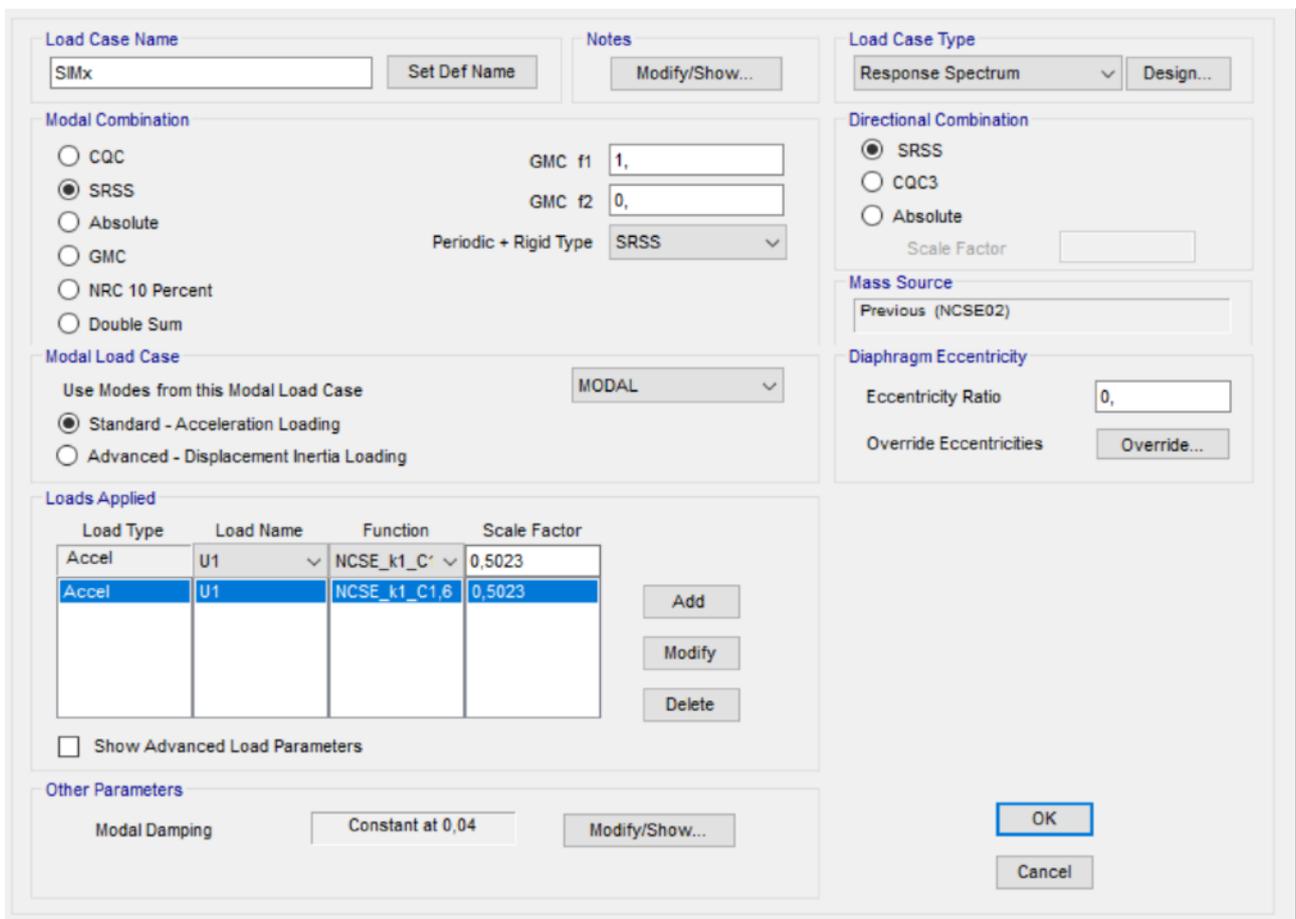
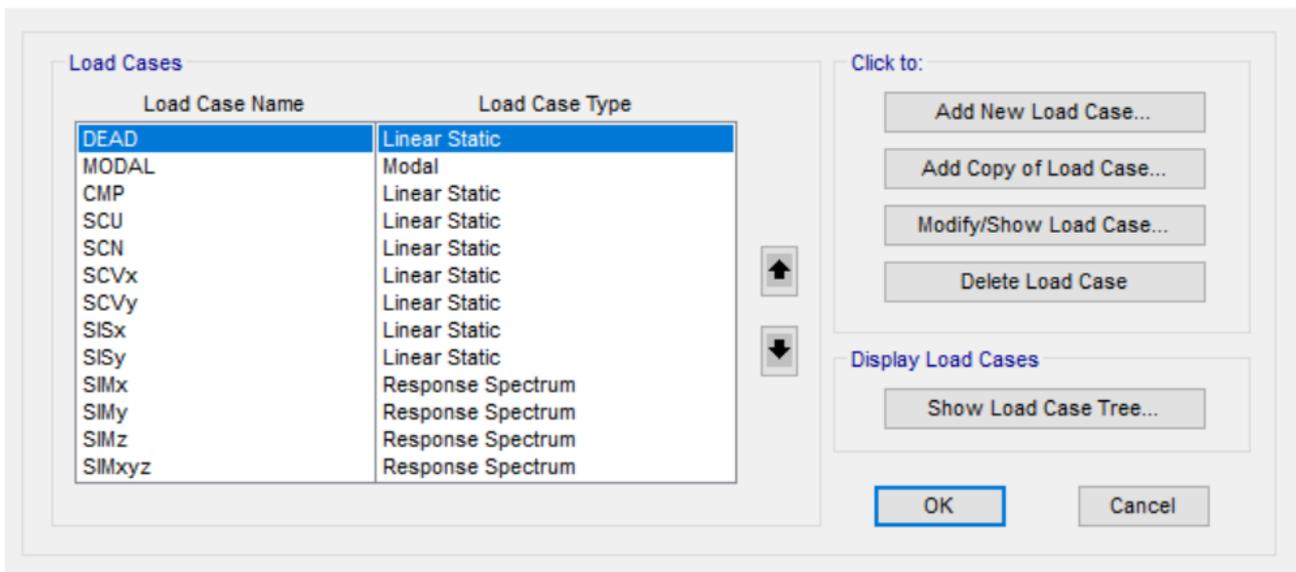
1. Define - Mass Source



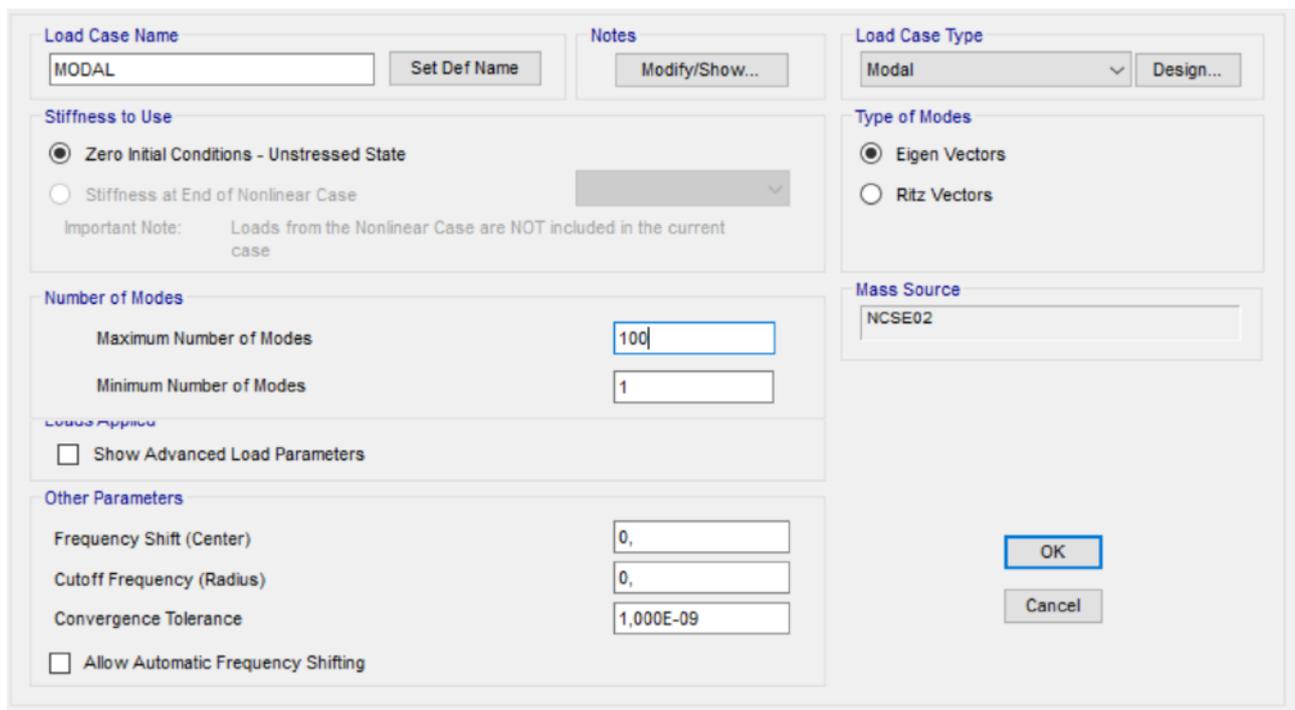
2. Define-Functions-Response Spectrum



3. Define - Load Cases



4. Define - Load Cases - Modify/Show Load Cases



En este punto se asigna el número de modos de vibración. Para el análisis final de la estructura se aumentara hasta 1000 modos de vibración, para poder movilizar la masa hasta un 90 %.

- Movimientos producidos en sismo modal

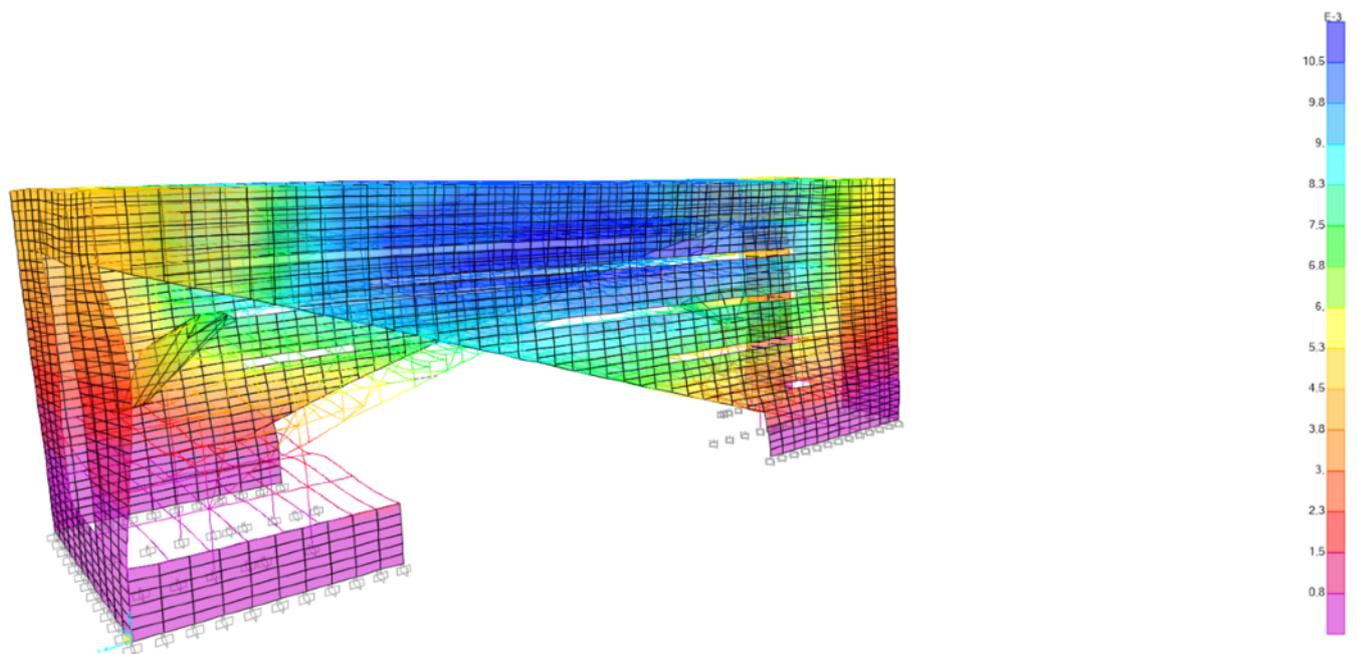


Figura 8 : Primer modo de vibración en sismo modal en la dirección x. Fuente: Elaboración propia

3.4.2 COMBINACIÓN DE ACCIONES

Combinación de Estados Límite Último para dimensionado a resistencia

La comprobación de los Estados Límite Último se realiza para garantizar la seguridad de los ocupantes del edificio, ya que si se superan pueden producir un colapso parcial o total de la estructura.

Los Estados Límite Últimos se consideran los debidos a:

- Pérdida del equilibrio del edificio o de una parte estructuralmente independiente considerado como un cuerpo rígido.
- Fallo por deformación excesiva, convirtiéndose parcial o totalmente en un mecanismo, rotura de los elementos estructurales o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originarios por efectos dependientes del tiempo.

Para obtener la combinación ELU utilizamos la siguiente expresión, teniendo en cuenta las cargas permanentes, la sobrecarga de uso, la nieve y el viento. Además se tiene en cuenta los coeficientes parciales de seguridad y los coeficientes de simultaneidad.

$$\gamma_G \cdot G + \gamma_{Q,1} \cdot Q_1 + \gamma_{Q,2} \cdot \Psi_0 \cdot Q_2 + \gamma_{Q,3} \cdot \Psi_0 \cdot Q_3$$

En la planta de cubierta, la expresión para la comprobación ELU, quedaría de la siguiente forma.

$$1,35 \cdot G + 1,5 Q_1 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_3$$

En el resto de plantas, esta expresión se simplificaría de la siguiente manera:

$$1,35 \cdot G + 1,5 Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_2$$

Combinación de Estados Límite de Servicio para dimensionado a flexión

La comprobación de los Estados Límites de Servicio, son los que de ser superado afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento del edificio o a la apariencia de la obra.

Se debe comprobar las flechas relativas a :

- Las deformaciones que afecten a la integridad constructiva de la obra, que puedan afectar desfavorablemente a la apariencia de la obra. La flecha no será superior a $1/500$ en el caso de estudio.
- Las vibraciones que causen una falta de confort de las personas o que afecten al correcto funcionamiento de la obra. Siendo la flecha relativa máxima de $1/350$.
- Los daños o deterioros que puedan afectar desfavorablemente a la apariencia, durabilidad o a la funcionalidad de la obra. Siendo la flecha relativa máxima de $1/300$.

Se comprobarán las tres premisas, y se dimensionará para la más desfavorable. Teniendo en cuenta que cada flecha esta producida por diferentes combinaciones.

Para la primera comprobación se tomará en cuenta el porcentaje de cargas permanentes correspondiente a elementos que se disponen después de la tabiquería como son falsos techos o instalaciones y la sobrecarga de uso.

Para la segunda comprobación se utilizará solo la sobrecarga de uso, pues las vibraciones son producidas por el uso que se le da al edificio.

Y por último se comprobará la apariencia de la obra, cuya combinación esta constituida por las cargas permanentes y la fracción cuasipermanente de las sobrecargas variables.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se va a proceder a analizar los resultados obtenidos de SAP2000. Como se ha mencionado con anterioridad, se han adjudicado unas secciones de manera estimativa, como un predimensionamiento, y posteriormente se han ido aumentando las secciones hasta cumplir con las comprobaciones a ELU y ELS.

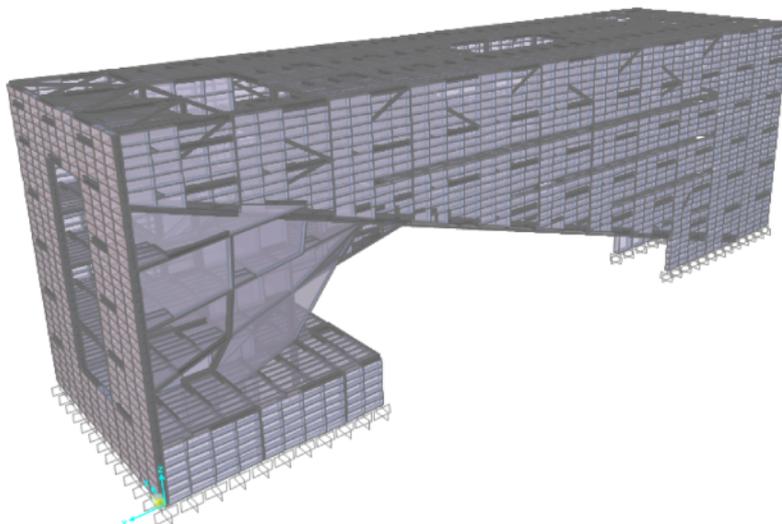
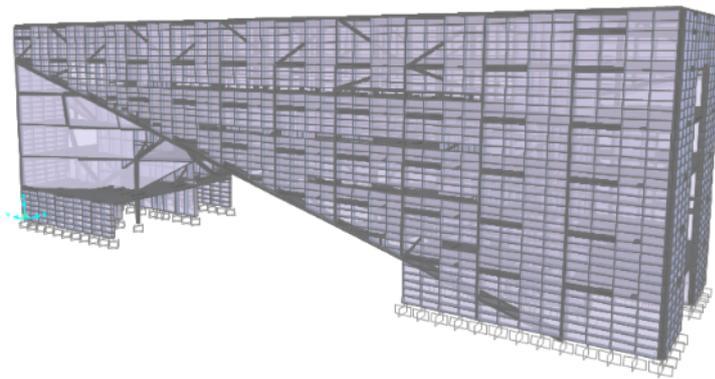


Figura 9 : Modelo de la estructura.Fuente: Elaboración propia

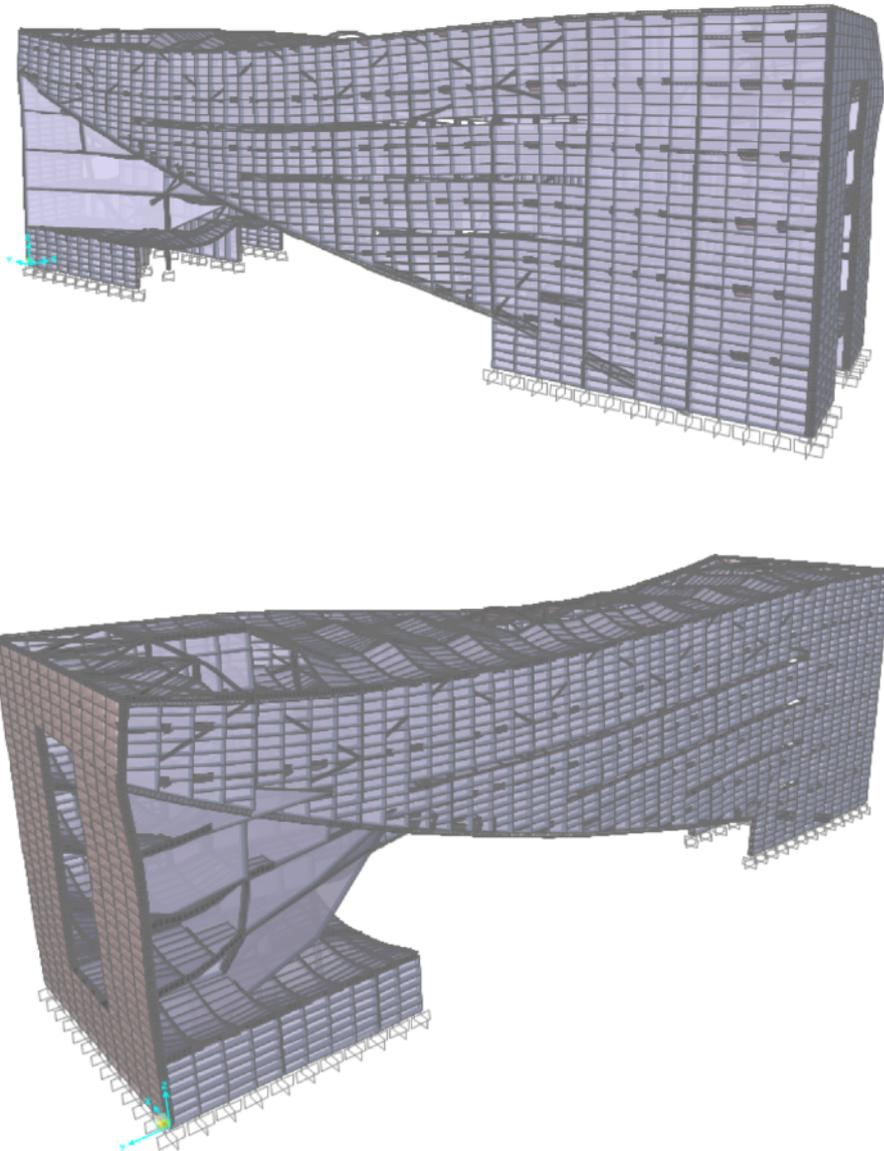


Figura 10: Deformada general de la estructura. Fuente: Elaboración propia

Como pequeña aproximación al funcionamiento de la estructura, se puede apreciar que las flechas máximas se van a producir en los centros de vanos y más en la parte central del edificio por no tener una continuidad hasta el suelo.

Comprobaciones a ELS

En primer lugar se va a realizar las comprobaciones a ELS, estudiando cada una de las deformadas de las tres comprobaciones. Cada una de ellas lleva aparejada una determinada flecha máxima.

- Flecha máxima producida por la combinación ELStab, la cual conlleva el 30% de CMP + SCU. Dicha combinación es la que se realiza con respecto a la integridad constructiva.

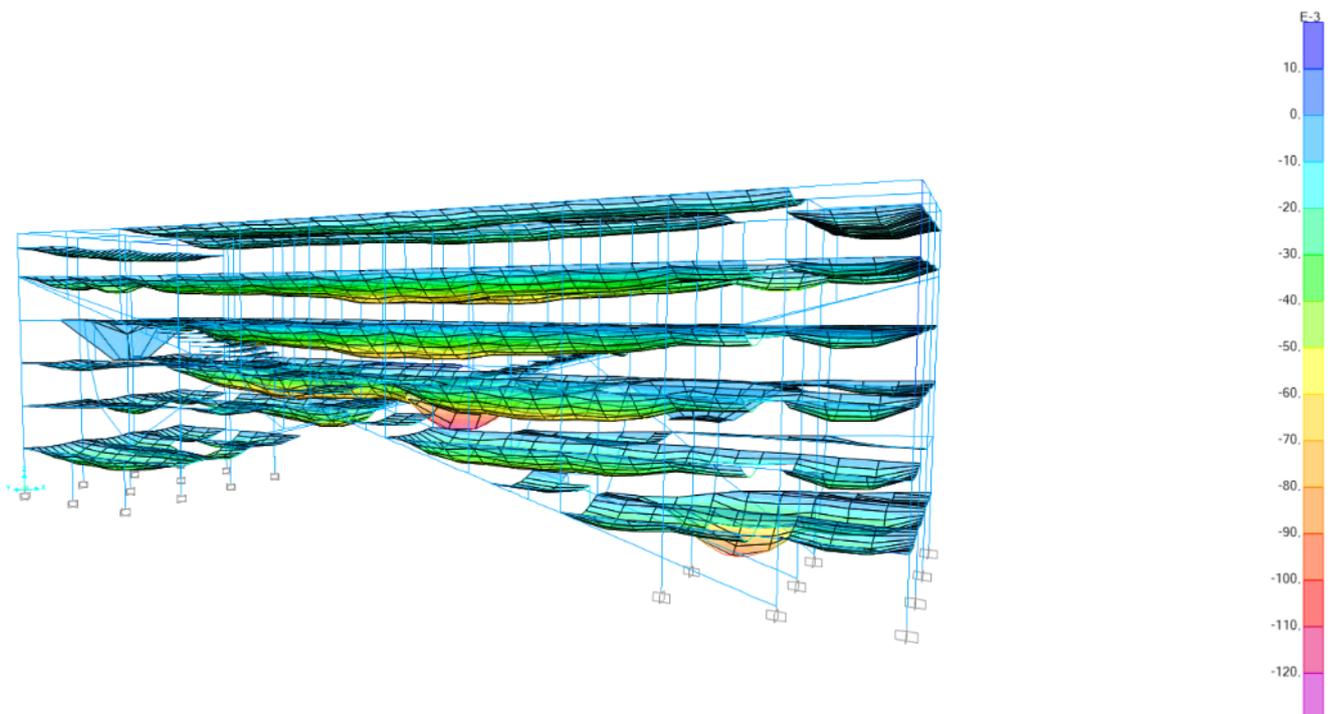


Figura 11: Deformada producida por la combinación ELStab. Fuente: Elaboración propia

- Flecha máxima producida por la hipótesis SCU, relativa al confort de los usuarios.

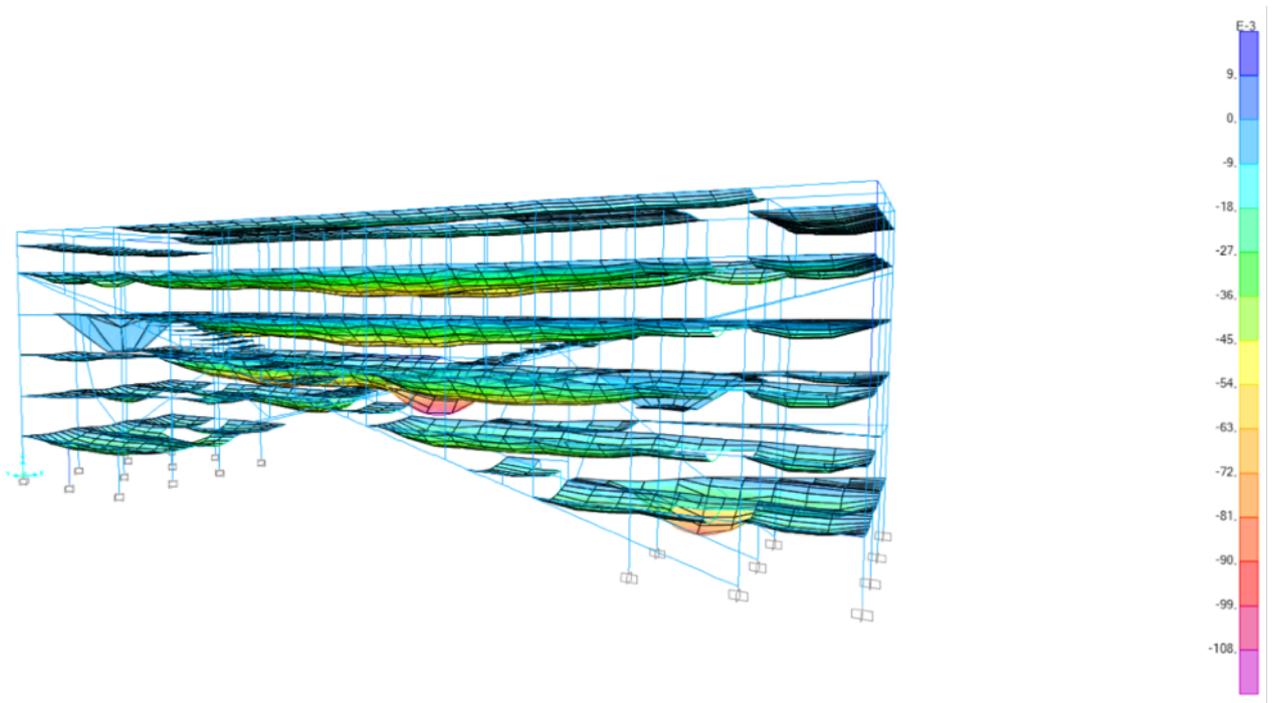


Figura 12 : Deformada producida por la hipótesis SCU. Fuente: Elaboración propia

- Flecha máxima producida por la combinación ELSqpu, relativa a la apariencia de la obra

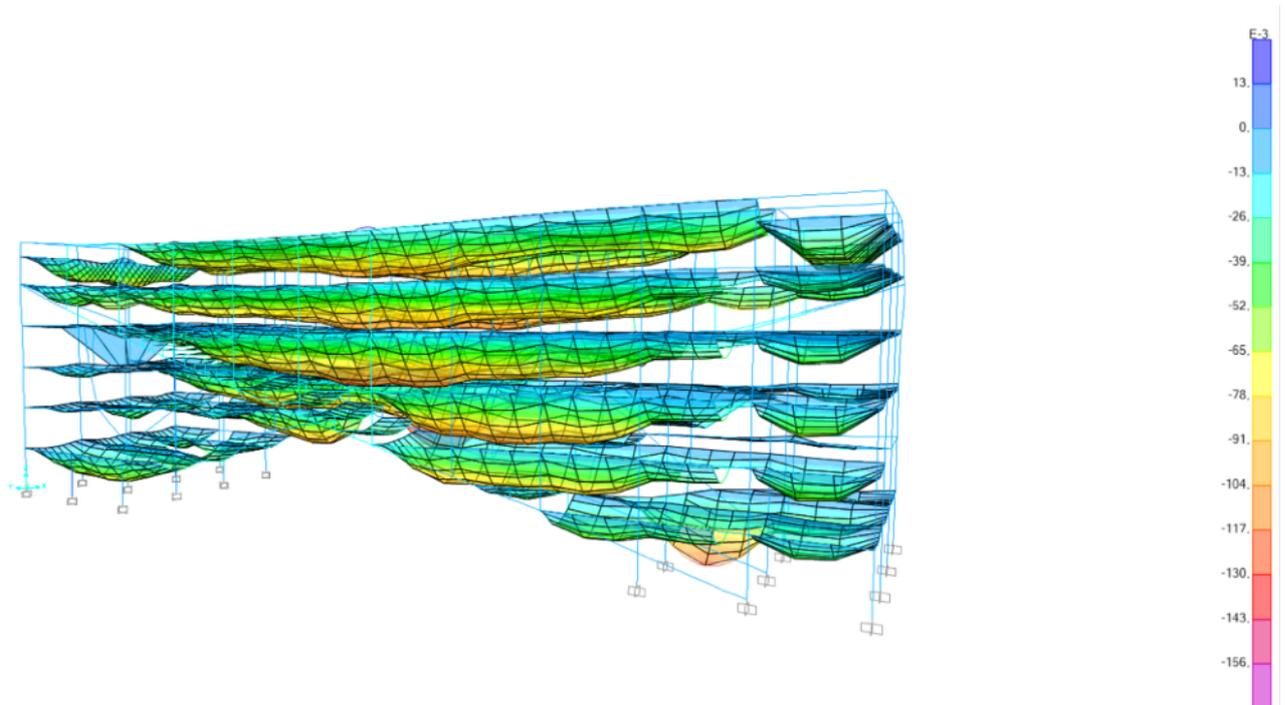


Figura 13: Deformada producida por la combinación ELSqpu. Fuente: Elaboración propia

La combinación ELS más desfavorable resulta ser ELS_{qpu}, en la cual se obtiene una flecha máxima de 120 mm. Las flechas máximas se producen en el centro de vano de los forjados, en concreto en un zuncho que forma la escalera del cuarto nivel. Las correas tampoco cumplen pues tienen una flecha de 80 mm.

Según la limitación de flecha establecida por la norma, debe ser menor a $L/300$. Siendo L la luz del elemento estructural, que en este caso son 13 m para el zuncho y 9 m para las correas. Por tanto, estos deben de tener una flecha máxima de:

$$f_{m\acute{a}x} = L/300 = 13000/300 = 43,3 \text{ mm para el zuncho}$$

$$f_{m\acute{a}x} = L/300 = 9000/300 = 30 \text{ mm para las correas}$$

Por tanto con el predimensionamiento no resulta favorable la comprobación a ELS, se aumentará el perfil de la sección hasta que cumplan con la flecha admisible.

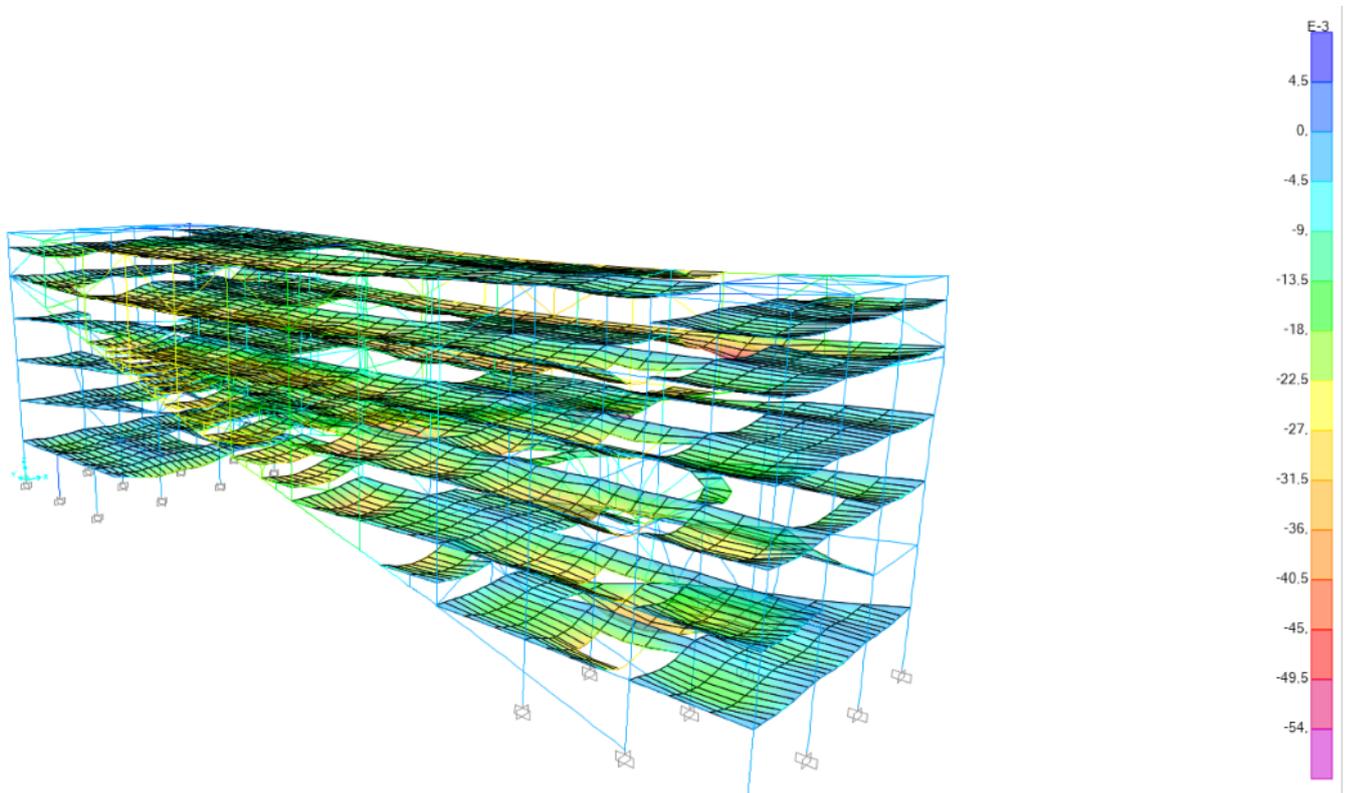


Figura 14: Deformada producida por la combinación ELS_{qpu} tras el dimensionamiento. Fuente: Elaboración propia

Los perfiles de las correas han pasado de IPE-200 a IPE-330 en su mayoría, y el perfil de los zunchos, de IPE-300 a IPE-450. Flecha después del dimensionamiento del zuncho (elemento más desfavorable), teniendo en cuenta que la flecha en el centro de vano es 55 mm y en los extremos de 29 mm

$$f_{real} = 54 - 29 = 25 \text{ mm} < f_{m\acute{a}x} = 30 \text{ mm} \text{ CUMPLE}$$

Comprobaciones a ELU

Para entender como funciona la estructura, es imprescindible conocer las solicitaciones, para ello se detallan a continuación los diagramas de las barras principales.

El SAP2000 diferencia con colores los valores negativos y positivos. Axiles positivos (tracción) en amarillo y axiles negativos (compresión) en rojo.

Se muestra los diagramas de axiles, cortantes 2-2 y momentos 3-3.

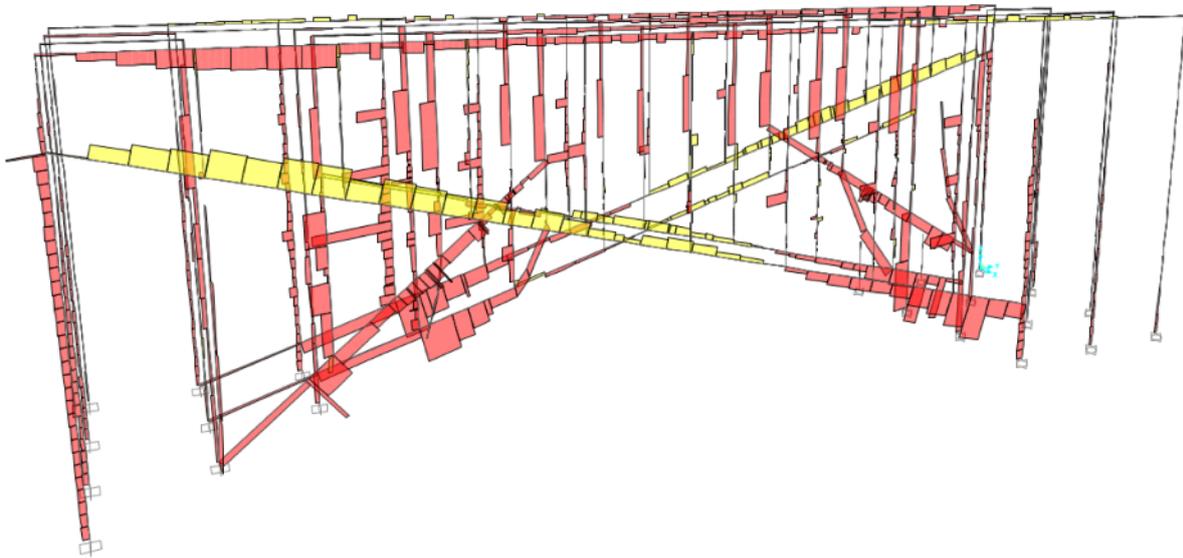


Figura 15: Diagrama de axiles en las barras principales Fuente: Elaboración propia

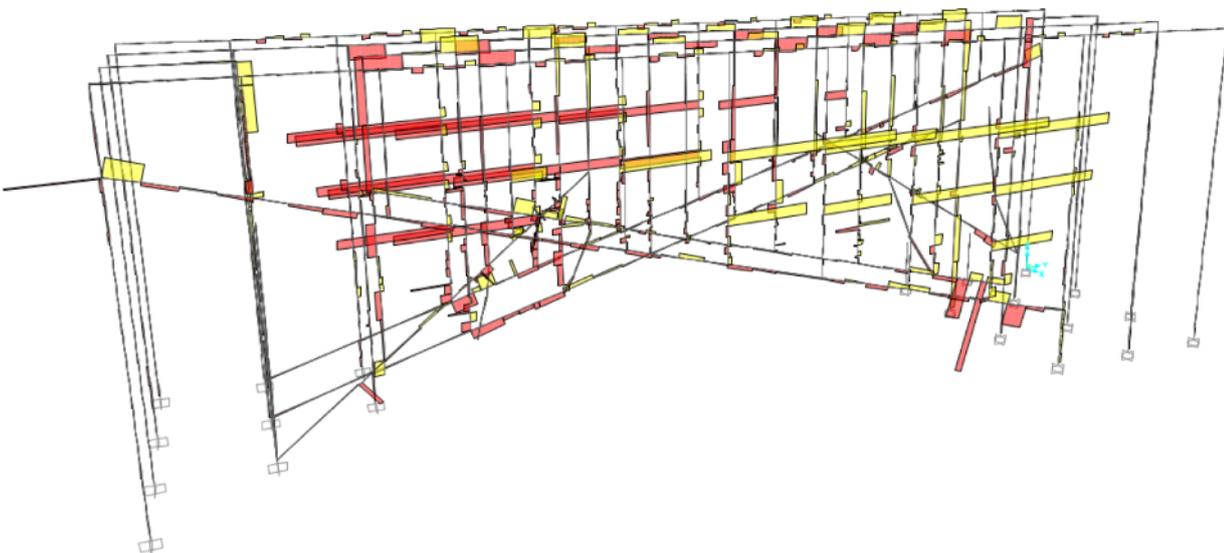


Figura 16: Diagrama de cortantes en las barras principales Fuente: Elaboración propia

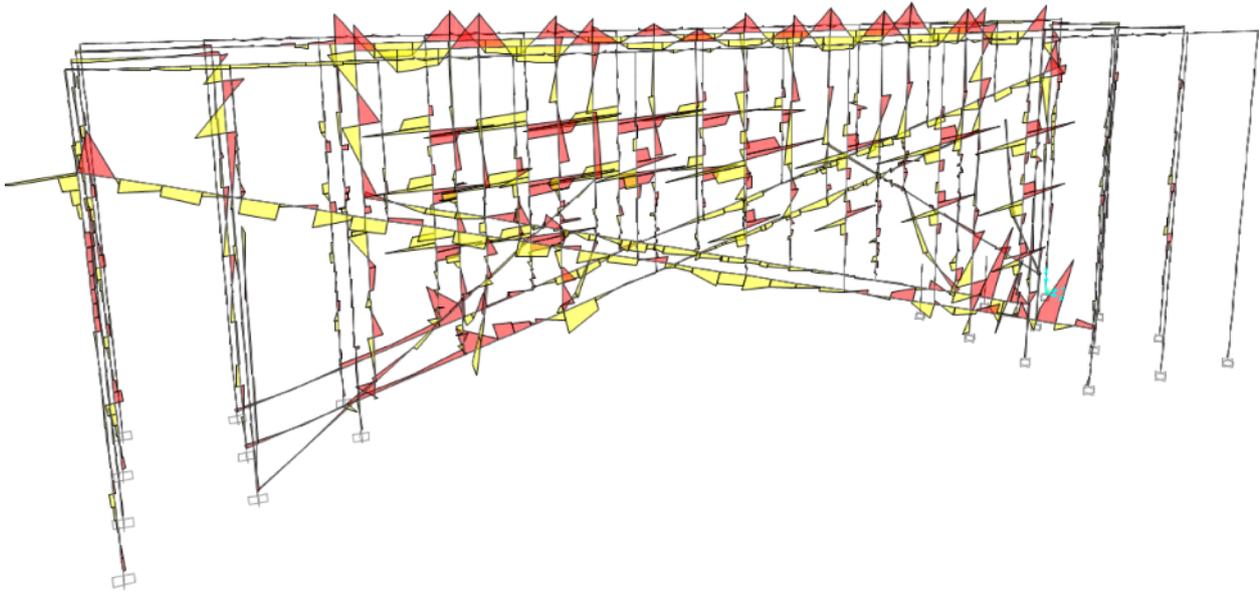


Figura 17: Diagrama de momentos en las barras principales Fuente: Elaboración propia

Atendiendo a los diagramas se puede establecer varias conclusiones de manera general, la parte central es la más solicitada, esto es debido a que las acciones exteriores producen un efecto de flexión en el conjunto del edificio debido a que solo los extremos tienen continuidad con el suelo, tiene el funcionamiento como si de una viga de canto se tratase.

Los esfuerzos se reparten equitativamente entre los 4 arcos, esto también es producido por el hormigón dispuesto en ellos.

Para las comprobaciones a ELU de la estructura, haremos uso del peritaje que nos proporciona el SAP2000, analizando automáticamente qué elementos metálicos no cumplen a resistencia.

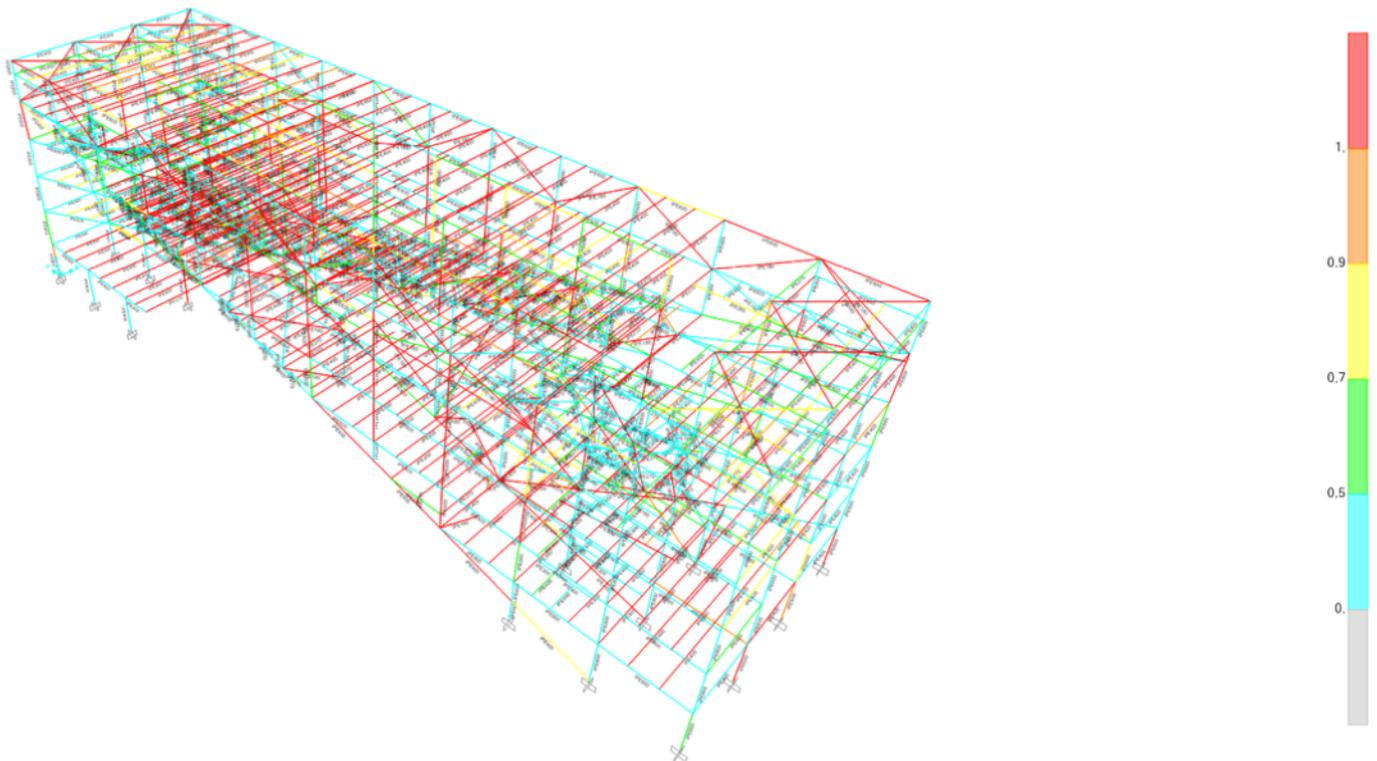


Figura 18: Peritación primera de los elementos de acero Fuente: Elaboración propia

El peritaje del SAP2000 nos muestra un gran numero de barras que no cumplen, ya que el predimensionado se realizó de forma estimativa.

La mayoría de los elementos verticales no cumplía por pandeo lateral, y se decidió eliminarlo de los cálculos en aquellos elementos que estaban sujetos transversalmente con el hormigón, por ejemplo en correas y vigas.

COMBO ID	STATION LOC	Ratio	MOMENT INTERACTION CHECK	MAJ-SHR	MIN-SHR
ELUunvx+	0,00	1,301 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,006	0,202	0,000
ELUunvx+	0,50	1,303 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,007	0,184	0,000
ELUunvx+	1,00	1,303 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,007	0,166	0,000
ELUunvx+	1,00	1,301 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,006	0,161	0,000
ELUunvx+	1,50	1,301 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,006	0,151	0,000
ELUunvx+	2,00	1,301 (T)	= 0,000 + 1,296 + 0,006	0,142	0,000
ELUunvx+	2,00	1,325 (C)	= 0,036 + 1,281 + 0,008	0,125	0,000

Item	Value	
11	DL Limit, L /	Program Determined
12	Super DL+LL Limit, L /	Program Determined
13	Live Load Limit, L /	Program Determined
14	Total Limit, L /	Program Determined
15	Total--Camber Limit, L /	Program Determined
16	DL Limit, abs	Program Determined
17	Super DL+LL Limit, abs	Program Determined
18	Live Load Limit, abs	Program Determined
19	Total Limit, abs	Program Determined
20	Total--Camber Limit, abs	Program Determined
21	Specified Camber	Program Determined
22	Net Area to Total Area Ratio	Program Determined
23	Live Load Reduction Factor	Program Determined
24	Unbraced Length Ratio (Major)	Program Determined
25	Unbraced Length Ratio (Minor)	Program Determined
26	Unbraced Length Ratio (LTB)	1,000E-04
27	Effective Length Factor Braced (K1 M...	Program Determined
28	Effective Length Factor Braced (K1 M...	Program Determined
29	Effective Length Factor Sway (K2 Ma...	Program Determined
30	Effective Length Factor Sway (K2 Mi...	Program Determined
31	Effective Length Factor (K LTB)	Program Determined
32	Bending Coefficient (C1)	Program Determined
33	Moment Coefficient (kyy Major)	Program Determined

Item Description
Unbraced length factor for lateral-torsional buckling for the frame object. This item is specified as a fraction of the frame object length. Multiplying this factor times the frame object length gives the unbraced length for the object. Specifying 0 means the value is program determined.

Explanation of Color Coding for Values
Blue: All selected items are program determined
Black: Some selected items are user defined
Red: Value that has changed during the current session

Set To Prog Determined (Default) Values:

Reset To Previous Values:

La siguiente decisión fue eliminar el pandeo en todos elementos verticales que se encontraban recubiertos de hormigón, pues la mayoría de los pilares están confinados en él, actuando conjuntamente. También hay que mencionar que se reforzó con placas de acero en los marcos con mayores esfuerzos; esto también impide el pandeo de algunos perfiles, pues están sujetos rígidamente.

Ya una vez realizados los cambios oportunos, se procedió a peritar la estructura y a aumentar los perfiles hasta el cumplimiento de las comprobaciones a ELU. En algunas barras, el axil era tan grande que debía aumentar la sección considerablemente, incluso no había sección suficiente. Por tanto, se tomó la decisión de aumentar la calidad del acero a S-450.

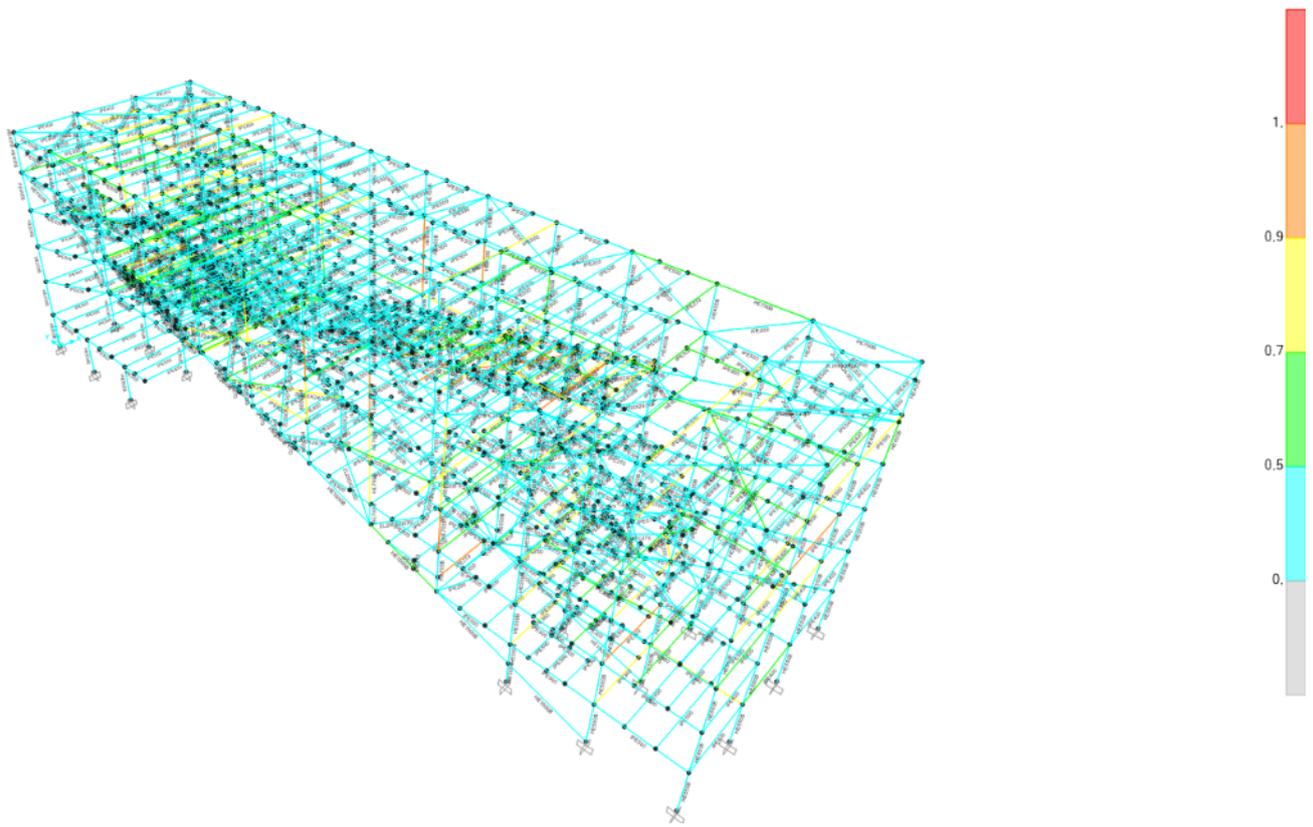


Figura 18: Peritación última de los elementos de acero Fuente: Elaboración propia

SAP2000



All steel frames passed the stress/capacity check.

Aceptar

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, durante el proceso de modelado en Autocad me resultó bastante costoso entender el funcionamiento de la estructura, sobretodo en la parte baja y central, ya que la información publicada es escasa. Además fue complicado de entender y modelizar la estructura. Por una parte, la zona de la vela, pues es una geometría muy irregular. Por otra parte, las diferentes plantas, pues si algo caracteriza al arquitecto, es la complejidad en su arquitectura. Todas las plantas son diferentes entre si, al limite de que en Autocad se tuvo que separar los elementos de cada planta.

La vela se basa en un paraboloides, para la modelización se utilizó como referencia las fotografías. Se base en unir, mediante la linea exterior del forjado, el pilar extremo del testero con una diagonal. Esto genera el lado de un triángulo que conforme se va construyendo para las diferentes alturas, produce un movimiento en la superficie.

En cuanto a las plantas, el arquitecto proyecta volumen rotundo en el exterior, pero en su interior esta totalmente fracturado para permitir el paso de la luz a todas las estancias del edificio. Esto supone una complejidad en el modelado, pues ninguna planta es igual a la otra. A esto hay que añadir la complejidad en los anfiteatros, los cuales ocupan varios niveles.

Una vez realizado el modelo, se importa los datos al SAP2000, se crean grupos para los diferentes elementos estructurales. Posteriormente asigné un predimensionado estimativo pues la información encontrada no fue la suficiente y por último se asignan las cargas (CMP, SCU, SCN, SCV y el SISM). Para la obtención de unos resultados fiable para el lugar, procedí a recabar información de normativas en Méjico.

Para la carga de viento tuve que modelizar también la vela, como si de una fachada se tratase, asignándole un espesor de 30 cm y de material hormigón, pero sin ninguna resistencia. Con este procedimiento buscaba dos soluciones, poder contemplar el peso de la vela en los cálculos y que repartiera la carga de viento a los forjados. Decidí designar la carga de viento como variable en fachada para que se ajustase a la realidad, además de analizar cómo influye el viento en este edificio.

La carga de sismo se ha realizado de forma modal. En un principio asignaba 100 modos de vibración para las comprobaciones, este movilizaba un 30% de la masa. En el modelo final se calculó con 1000 modos de vibración, acercándose al objetivo previsto de movilizar el 90 % de la masa. Este último modelo produjo que el ordenador estuviera unas 3 horas calculando.

Para las comprobaciones a ELS no surgieron demasiadas dificultades, pues era obvio donde se producirían las deformaciones y cómo solventarlas. En cambio, las comprobaciones a ELU resultaron confusas en un principio.

Durante las comprobaciones a resistencia, algunos elementos como las correas o los pilares de las fachadas longitudinales, situados en la zona central, dieron como resultado unas dimensiones de perfiles excesivas. Esto fue solventado mediante la eliminación del pandeo lateral en los elementos horizontales, pues están rigidizados con los forjados en sentido transversal. Además, los pilares situados en los muros, tanto en la fachada como en los marcos centrales, están recubiertos por el hormigón armado. Este actúa conjuntamente con los perfiles de acero, rigidizando e impidiendo que se produzca el pandeo.

Aun así, en algunas ocasiones, los pilares cumplían escasamente. Este hecho es debido a que no se modelizó las placas de acero que se disponen entre los marcos más desfavorables. Otra causa de ello, es que los pilares de la estructura real tienen unos refuerzos que permiten el trabajo conjunto del hormigón y el acero. Estos tampoco fueron considerados en el modelo, y por tanto se necesitaba aumentar las secciones de los perfiles para que cumpliesen por esfuerzos axiales.

Tras el estudio realizado, considero que la obra es todo un reto estructural, que se ha debido de estudiar minuciosamente todos y cada uno de los detalles, sin dejar cabo suelto. Esto se puede apreciar en la cantidad de perfiles, refuerzos y uniones, dispuestos en toda la estructura.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía consultada

- ANDO, TADAO , Complete works, Edit: Taschen (2006)
- AUPING, MICHEL Y ANDO, Tadao, conversaciones, edit. Gustavo Gili (2003)
- DAL CO, FRANCESCO, complete works, edit. London : Phaidon (2000)
- FUTAGAWA, YUKIO Y ANDO, Tadao, recent project 2, Tokyo: A.D.A. Futagawa (2015)
- FUTAGAWA, YUKIO Y ANDO, Tadao, recent project 1, Tokyo: A.D.A. Futagawa (2013)
- UDEM, Centro Roberto Garza Sada (2014)
- EL CROQUIS N°44, Tadao Ando 1983-1992

Imágenes utilizadas

- DAL CO, FRANCESCO, complete works, edit. London : Phaidon (2000)
Imágenes : 2, 3
- FUTAGAWA, YUKIO Y ANDO, Tadao, recent project 2, Tokyo: A.D.A. Futagawa
Imágenes: 6, 7 , 9
- UDEM, Centro Roberto Garza Sada

Imágenes : 4, 10 , 11 ,12 ,13 ,14,15 ,16
17, 18 , 19 , 20 , 21, 22, 23 ,24 , 25 , 26
27, 28 , 29 , 30, 31, 32, 33, 34 ,35, 36, 37
38 , 39

- Elaboración propia

Imágenes: 1