



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL RETABLO DE
LOS REYES DE LA CATEDRAL DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

YUSEF ZAVALZA CABELLO

TUTOR:

ING. ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ



México D.F., 2012

Lo que somos es el regalo de Dios para nosotros,
en lo que nos convertimos es nuestro regalo para Dios.

Eleanor Powell

Me resulta imposible pensar en éste logro sin que a mi mente vengan los nombres de mis abuelos, Virginia y Rogelio, quienes han sido como mis padres. Para ellos toda mi admiración, cariño y agradecimiento.

Albert Einstein dijo: Comienza a manifestarse la madurez cuando sentimos que nuestra preocupación es mayor por los demás que por nosotros mismos... Familia Alguera, infinitamente gracias...

Mi reconocimiento a los Profesores y Colegas de mi amada Facultad de Ingeniería, la mejor.

Al Instituto de Ingeniería por tener siempre abiertas sus puertas a quienes como yo, buscan aprender de los mejores. Un especial agradecimiento al Ing. Roberto Sánchez por su apoyo, paciencia, liderazgo y consejos, hoy y siempre gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	3
1.1. Aspectos históricos	3
1.2. Convocatoria para la ejecución del Retablo de los Reyes	5
1.3. Gerónimo Balbás y el Retablo de los Reyes	7
2. DESCRIPCIÓN DEL RETABLO DE LOS REYES	11
2.1. Ubicación y clasificación general del retablo	11
2.2. Composición artística del retablo	13
2.3. Levantamiento estructural	18
2.3.1. Concha	21
2.3.2. Cuerpo	25
2.3.3. Predela	30
3. DAÑOS E INTERVENCIONES	35
3.1. Intervención de 1940	36
3.2. Intervención de 1981	37
3.2.1. Levantamiento de daños	37
3.2.2. Proceso de restauración	39
3.3. Daños en el retablo registrados en 1989	39
3.4. Estado del retablo en 2002	40
3.5. Intervención al retablo entre 2003 y 2006	42
3.5.1. Primera etapa del proyecto	43
3.5.2. Segunda etapa del proyecto	43
3.5.3. Tercera etapa del proyecto	43
3.5.4. Daños pendientes por atender en la parte posterior del retablo ...	44
4. MODELO ANALÍTICO	47
4.1. Aspectos generales	47
4.2. Método de los elementos finitos	48
4.3. Propiedades mecánicas del material	49
4.4. Descripción general del modelo analítico	54
4.4.1. Predela	57
4.4.2. Cuerpo	58
4.4.3. Concha	59
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	61
5.1. Análisis ante cargas gravitacionales	61
5.1.1. Aspectos generales	61
5.1.2. Desplazamientos	63
5.1.3. Esfuerzos	66

5.2. Análisis sísmico	68
5.2.1. Aspectos generales	68
5.2.2. Desplazamientos	74
5.2.3. Esfuerzos	84
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS	95

INTRODUCCIÓN

El Retablo de los Reyes es una de las piezas artísticas más importantes de la Catedral Metropolitana y a su vez el máximo exponente del barroco mexicano. Con él se inició el periodo barroco en la Nueva España, cuyo elemento más destacado fue el uso de la columna estípite monumental. Es una obra artística verdaderamente invaluable, se halla dentro del gran número de monumentos históricos que forman parte de nuestro patrimonio cultural, y además, ya sea por su belleza, complejidad o lo que representa en el plano espiritual o histórico, despierta un gran interés universal.

Esta majestuosa obra colonial, situada en el ábside de la Catedral Metropolitana, puede describirse como una estructura de gravedad, que gracias a su planta de forma poligonal y al diseño de los módulos que la integran ha resistido los embates del tiempo y de la acción humana. Esta solución estructural ha logrado que resista una intensa historia sísmica, asentamientos diferenciales de la catedral, un terrible incendio, infiltración pluvial y falta de mantenimiento. A principios de este milenio era visible su mal estado tanto estructural como artístico y constituía un riesgo tanto para su estabilidad como para la seguridad de quienes lo visitan.

Por tal motivo, la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural en colaboración con la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del INAH, inició en el año 2002, un proyecto denominado “Restauración del Retablo de los Reyes de la Catedral Metropolitana”. Dicho proyecto tuvo como finalidad la conservación, investigación, recuperación y uso social de nuestro patrimonio cultural.

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México apoyó dicho proyecto realizando diversos estudios y propuestas de intervención de carácter estructural.

Dada la complejidad estructural del retablo el instituto de ingeniería considero necesario realizar un levantamiento estructural detallado de la obra artística y desarrollar el modelo tridimensional de la misma para estudiar su comportamiento, parte de estos estudios sirvió de base para el desarrollo del presente trabajo.

Objetivos y alcances

Llevar a cabo una búsqueda bibliográfica y documental sobre temas relacionados con el Retablo de los Reyes.

Realizar el levantamiento estructural del retablo para evaluar sus daños y elaborar, en tres dimensiones, la representación gráfica del mismo.

Realizar un modelo analítico a partir de la representación gráfica tridimensional aplicando para ello el método de los elementos finitos. A partir del modelo analítico evaluar el comportamiento estructural del mismo ante la acción de su peso propio y sismo.

1. ANTECEDENTES

1.1 Aspectos históricos

La Catedral Metropolitana (*Figura 1*) se dedicó en dos ocasiones en el siglo XVII: en 1656 y en 1667. La primera vez, en forma apresurada, se hizo para no quedar detrás de la Catedral de Puebla. Inconclusa pero techada fue abierta al pueblo; se hallaba su exterior sin torres ni portadas; su interior se decoraba con elementos de la vieja catedral como la antigua sillería de coro y los retablos del siglo XVI y unos cuantos de la primera mitad del XVII.

En 1666, con motivo de las exequias de *Felipe IV*, el edificio ya era apto para ésta y otras grandes ceremonias y un año después, en 1667, fue solemnemente dedicada por segunda ocasión (*Tovar de Teresa, 1992*).

A partir de 1667 se suscitó el problema de la colocación del coro y los órganos; frente al altar mayor, se dirimió por ubicarlos en la nave central, así el altar mayor se colocaría en el ábside de la catedral. Ese antiguo altar fue dedicado en 1678 y demolido en 1739 para colocar en su sitio uno nuevo que utilizaría las famosas columnas de alabastro.



Figura 1. Catedral Metropolitana

Entre los años de 1670-1699, la Catedral Metropolitana, gracias al empeño de Aguiar y Seixas fue cubierta de retablos y pinturas. El arzobispo Francisco Aguiar y Seixas tenía como protegido a José de Sállago un ensamblador y escultor de la segunda mitad del siglo XVII, quien realizó el artesonado y las tribunas de la Capilla del Rosario de Santo Domingo de México y el Retablo de Guadalupe para la Parroquia de San Miguel, entre otras obras, de las cuales desafortunadamente ninguna subsiste. Sállago presentó en 1688 un proyecto para construir el más suntuoso retablo realizable en la Nueva España.

Tovar de Teresa (1985) describe a detalle el proyecto de Sállago, a continuación y de manera sucinta se menciona lo más relevante. El proyecto tenía dos opciones, la primera consistía en un retablo con el zócalo y las columnas hechas de alabastro, esto sin duda se debe a la gran aceptación de ese material utilizado en Puebla para el altar de los reyes de la catedral entre otros muchos, después del zócalo un entablamento y tres cuerpos. El primer cuerpo sería de orden jónico y llevaría dos esculturas de santos reyes y en medio, un tablero de pintura; el

segundo cuerpo llevaría nueve columnas, dos esculturas y un tablero; el tercer cuerpo llevaría un sotabanco y encima cuatro columnas, dos santos y un tablero. Una enorme pintura abarcaría el segundo y tercer cuerpo del retablo y llevaría un marco muy ornamentado. La parte superior sería semicircular y en las enjutas irían unos relieves de ángeles estofados. Encima de la pintura estarían las armas del rey, un orbe y una cruz.

En la segunda opción el retablo llevaría veintiséis columnas redondas y cuarenta y cuatro medias columnas, todas de alabastro, sería semejante al otro, salvo el remate con sus “cuadros muy bien tallados cerrando los tres gajos de dicha bóveda, en el medio del cerramiento una gloria donde han de ir las tres divinas personas de la Santísima Trinidad”.

En cualquiera de las dos opciones el dorado estaría a cargo de Gerónimo Martín y las pinturas las realizaría Villalpando y costaría casi treinta mil pesos en oro. Si no se llevó a cabo el proyecto fue por una de dos razones: por el muy alto costo y por haber muerto el arzobispo Francisco de Aguiar y Seixas, siendo el principal apoyo de Sállago.

1.2 Convocatoria para la ejecución del Retablo de los Reyes

El proceso de convocatoria, los concursantes y las características de sus proyectos han sido descritos minuciosamente por *Tovar de Teresa (1985)*, a continuación y de manera resumida se mencionan los detalles más importantes.

Entre 1703 y 1708, el *Rey Felipe V* ordenó se destinasen diecisiete mil pesos en moneda de oro para la fabricación del retablo. Para el mes de noviembre de 1709 el cabildo ya tenía la orden de dar comienzo a las diligencias. La selección del diseño sería llevada a cabo por medio de un concurso, el proyecto debería reflejar “autoridad, esplendor y grandeza”.

En el concurso participaron algunos de los mejores maestros de la capital, por ejemplo, el dorador Jacinto Nadal y Llubet quien junto con Pedro Maldonado tuvo el taller con mayor demanda de obras hacia 1690, año en que tuvieron problemas con el gremio de pintores y doradores ya que monopolizaban la actividad.

Mateo de Pinos fue otro de los participantes, sus conocimientos en teoría del arte y su amplia experiencia le otorgaron un estatus que lo distinguía del gremio de artesanos y carpinteros, e incluso llegó a autodenominarse como “maestro arquitecto-retablista”. El diseño de Mateo de Pinos llevaría ocho tableros de pinturas y varias esculturas de santos reyes. Tendría tres cuerpos: el primero corintio y los otros dos de orden compuesto. La madera sería de ayacahuite y los tableros de pintura de cedro viejo.

El arquitecto Juan de Rojas fue otro participante. Presentó dos propuestas para el retablo: una de tres cuerpos y otra de dos cuerpos con columnas monumentales, coronados ambos diseños por una misma cornisa y remate. Sin duda alguna un proyecto muy prometedor. Cuando el cabildo preguntó a Jacinto Nadal cuánto cobraría por el dorado de cada una de las piezas presentadas en el concurso, Nadal contestó que le llevaría tiempo tomar una resolución, sobretodo en el caso del diseño de Juan de Rojas por “ser obra muy exquisita y primorosa”.

Los concursantes de 1709 no concebían el retablo ordenado y reticular, sino como una impresionante y monumental obra barroca, dorada y escenográfica pues para entonces el estilo del retablo proyectado en 1688 estaba ya en desuso, en aquel tiempo las columnas lisas de alabastro de acento clasicista, identificadas con los retablos y altares de Puebla, no eran ya populares; ahora y como nunca, triunfaban las columnas salomónicas, la pilastra estípite y las grandes masas doradas. Fue debido a los presupuestos presentados por los maestros, los cuales rebasaban en mucho la cantidad de dinero de la cual disponía el cabildo, que el retablo no pudo llevarse a cabo.

1.3 Gerónimo Balbás y el Retablo de los Reyes

Gerónimo Balbás o de Balbás (?-1748) un español tramoyista, escultor y arquitecto, nacido aparentemente en Zamora, que había llevado de Madrid a Sevilla una hermosa pieza decorativa: la pilastra estípite, con la que realizó el opulento retablo del sagrario de la catedral de dicha localidad, destruido por el fuego en 1824. Recibió hacia 1715, y tal vez recomendado por algún miembro del Cabildo de Sevilla, la invitación mexicana para acudir a la obra catedralicia de la Ciudad de México (*Tovar de Teresa, 1990*).

Balbás trabajó en el proyecto del retablo y en muy corto tiempo dio inicio a la ejecución de las labores de construcción, terminó la obra en blanco en 1725 pero su dedicación formal fue hasta 1737 ya con los óleos de Juan Rodríguez y el dorado que aplicó Francisco Martínez. En 1775 se terminó la unificación plástica del área del presbiterio con la integración de los retablos colaterales, cabe mencionar que el Retablo de los Reyes fue dedicado en origen al entonces Príncipe de Asturias futuro *Rey Fernando VI*.

La importancia del Retablo de los Reyes (*Figura 2*) radica en que se trata de la primera obra de su género en la que se sustituyeron las columnas por soportes de trazo más geométrico: los estípites, éstos son elementos arquitectónicos, artísticos y decorativos que tienen su propia historia y que fueron introducidos por Balbás en la panorámica del arte virreinal de la Nueva España.

Su importancia fue tal que dieron nombre a una nueva etapa del barroco en México. Pero ésta no fue su única innovación: el maestro castellano prescindió de la estructura plástica a base de cuerpos superpuestos y resolvió el discurso iconográfico en un solo cuerpo con sutiles divisiones horizontales (*Fernández, 1959*). Por todo esto el Retablo de los Reyes fue el punto de partida para todas las obras artísticas semejantes y que se producirían después de su realización.

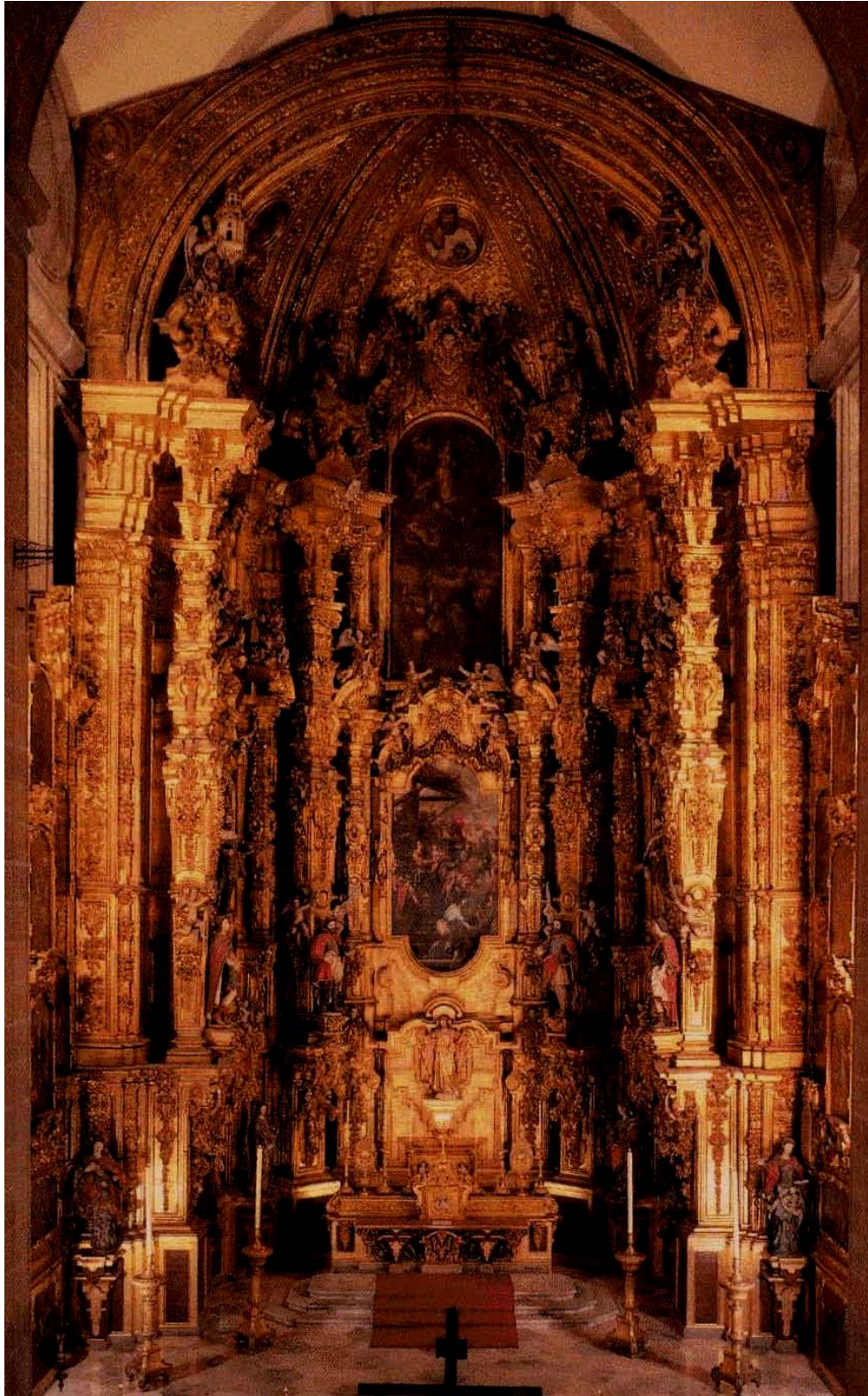


Figura 2. El Retablo de los Reyes

El Retablo de los Reyes produce interés en los estudiosos desde su nombre. Algunos autores afirman que la inclusión de una capilla real en el ámbito de varias catedrales novohispanas se debió a la necesidad de disponer de un espacio en el que recibir a los reyes de España cuando visitaran sus posesiones americanas; también se acepta que recibían este nombre por ser obras patrocinadas por la corona, aunque otros sostienen que las capillas reales y los altares que los contemplan recibían esa denominación por ser espacios de culto destinados a los reyes y reinas que llegaron a ser santos.

Desde distintas apreciaciones, entre las que destacan la histórica y la artística, el Retablo de los Reyes de la Catedral Metropolitana es una de las obras esenciales del barroco en México.

2. DESCRIPCIÓN DEL RETABLO DE LOS REYES

2.1 Ubicación y clasificación general del retablo

La Capilla de los Reyes se ubica en el ábside de planta poligonal de la Catedral Metropolitana, al fondo está el altar y tras él, el retablo que lleva el mismo nombre. Su construcción llevó 19 años, de 1718 a 1737. Puede ser clasificado como estípite de tres calles; está formado por un sotabanco, una alta predela, un solo cuerpo y un remate en forma de concha.

El retablo se hizo de madera de ayacahuite en la conformación de la estructura y de cedro para los soportes de las pinturas, aunque estudios recientes confirman el uso de otras clases de madera como oyamel, cedro blanco y pino básicamente. Es una estructura simétrica, desde su planta se puede apreciar su barroquismo, y una superficie coruscante que se desarrolla a lo largo de grandes líneas. El conjunto fue sobredorado con hojas de pan de oro de 23 kilates; las tallas, también de madera, fueron vestidas mediante ropajes de tela encolada y concluidas con detalles de policromía a base de temple sobre las encarnaciones; por su parte, las pinturas son óleos sobre tela sujetos a la estructura por medio de bastidores de madera (*Cortés et ál., 2006*).

La disposición de la obra nos muestra que el retablista barroco no tomó en cuenta el marco general de arquitectura clásica en que colocó su retablo, por un lado adelantó el retablo entero despegándolo del muro del fondo para en ese espacio alojar las escaleras (*Figura 3*), de este modo no coincide su planta con las formas arquitectónicas del ábside. Por otra parte, no coinciden las dos primeras grandes pilastras del retablo, a ambos lados, con las pilastras que sobresalen de los muros mismos, pues aquéllas quedan más adelante que éstas. El resultado de dicho desajuste es que el retablo en lo alto invade un tanto de los vanos de las ventanas rectangulares y los marcos de los óculos.

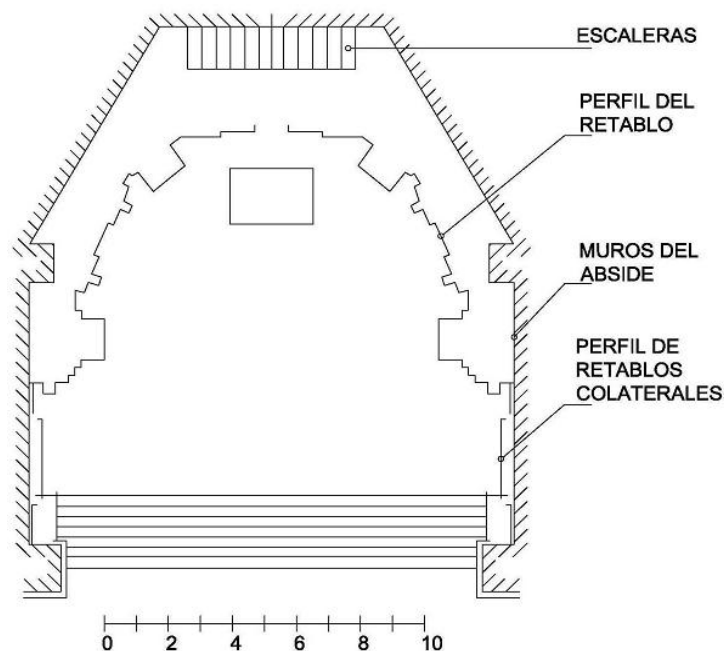


Figura 3. Vista en planta del Retablo de los Reyes

Cabe señalar que como el retablo no cubría en su totalidad los muros laterales del ábside, se instalaron ahí otros retablos de escaso relieve (*Figura 4*), tallados, dorados y con pinturas que completan la decoración; y contribuyen al efecto total de gruta de oro, y que en lo absoluto restan interés al Retablo de los Reyes mismo, ya que dichos retablos son de menor tamaño y esplendor. Ambos fueron realizados por Isidoro Vicente Balbás, hijo presuntamente de Gerónimo Balbás.



Figura 4. Retablos colaterales

2.2 Composición artística del retablo

El Retablo del los Reyes, siendo la máxima y la primer obra del barroco en América, se convirtió en la referencia para los retablos que se construirían posteriormente en el nuevo continente. *Fernández (1959)* hace una descripción detallada de este retablo, a continuación, y de manera sucinta, se destacan algunos de los principales detalles artísticos de esta obra monumental.

Gerónimo Balbás colocó dos pilastras laterales paralelas a los muros y otras dos en ángulo al fondo del retablo, pero éstas, esviadas sobre ejes diagonales y sus bases son ligeramente cóncavas en la cara principal. Así, las cuatro grandes pilastras suavizan, por su colocación, el poliangulismo y sugieren un medio círculo. Por la disposición y forma semicircular del retablo, al ser visto en elevación, oculta

siempre algunos de sus elementos, y hay que ponerse en movimiento para ver todas sus partes, las cuales consisten como se describe a continuación:

A ambos lados y entre pilastra y pilastra resaltan otras menores que forman sendos retablos laterales secundarios. El espacio al fondo parece muy sencillo en planta, pero en alzado forma un tercer retablo de mayor complicación que los laterales.

El retablo no termina en el copete tradicional, está rematado por una concha o casquete que cubre el ábside y asume la forma del intradós de la bóveda del edificio (*Figura 5*). Este casquete cubre todo el nicho y su ornamentación se organiza en tres gajos cuyas intersecciones siguen los ejes de las grandes columnas estípite. En el centro de cada uno de los paneles triangulares se ubica un medallón en relieve: al poniente *San Pedro* y al oriente *San Pablo*, y entre ellos el del *Padre Eterno*.



Figura 5. Vista del intradós del remate con forma de cocha

Visto de frente, se observan pilastras laterales sobre los muros, reforzadas por contrapilastras que suben hasta rematar en capiteles de orden compuesto, y sobre

éstos se eleva una porción de entablamento con su cornisa. De la cornisa arranca la arquivolta que llega hasta la bóveda del ábside y cuyos extremos laterales, entre la arquivolta, los muros y la bóveda, se cubren con enjutas y dos medallones, el del lado poniente de *San Joaquín* y al oriente de *San José*.

Visibles son las cuatro grandes columnas estípite de casi doce metros de altura; adosada a cada una de ellas existe una pilastra de la misma elevación. Las mismas columnas están talladas, doradas y ricamente decoradas, las conforman: un pedestal; una pirámide truncada y alargada con la base mayor hacia arriba y cuya altura rebasa los tres metros; un cubo; y un capitel de orden compuesto.

En la parte baja de los estípite, y aprovechando la inclinación de las pirámides invertidas, se colocó la estatua de un rey. La figura piramidal de cada estípite aparece realizada mediante molduras horizontales con motivos vegetales y de hojas de planta.

Entre los estípite que dan forma y lugar a las calles del retablo pueden apreciarse columnas estípite de cinco metros de altura, aunque éstas son menores a las anteriores, sus características son semejantes (*Figura 6*).

Los retablos laterales alojados entre las cuatro grandes pilastras quedan semiocultos debido a que las calles en que se encuentran están sesgadas. Estos retablos incluyen dos columnas estípite de cinco metros de altura; al centro de éstos hay un nicho rectangular que aloja la escultura de dos santos. A los pies de los santos, bajo airosos cortinajes, angelillos soportan un escudo que contiene la tiara y las llaves de la iglesia. En la parte alta de las columnas, sobre sus cornisas, un frontón curvo y roto enrosca sus puntas en volutas; encima de éste, ángeles cargan frutas, y en el centro hay un gran remate en forma de frutero. Sobre estos remates hay dos cuadros respectivamente, de marco curvilíneo con una pintura y más arriba un escudo con monograma.



Figura 6. Columnas estípite y ornamentación

La calle central es la más importante y acoge los principales motivos decorativos del retablo. Es de sencilla ornamentación en su parte baja, de este modo sirve de fondo a la mesa del altar. Al nivel de los retablos laterales, rodeada por una moldura, se encuentra una gran pintura llamada *La Adoración de los Santos Reyes* (Figura 7), lienzo realizado por Juan Rodríguez Juárez cuyas dimensiones alcanzan 4.8 m de alto por 2.9 m de ancho. Sus partes superior e inferior se interrumpen para dar lugar a semicírculos, a los lados columnas estípite rematan en fragmentos de frontones curvos y rotos sobre los que posan ángeles

semejantes a los que se observan en los retablos laterales y que se encuentran al mismo nivel.

La parte superior de la misma calle central está enmarcada por molduras curvas y quebradas, conchas, hojarasca, cuatro angelillos que llevan palmas en las manos y cortinajes. Sobre el remate sobresalen cuatro cornucopias dispuestas para que sus velas iluminen la pintura superior, éstas son las únicas luces artificiales que incluyó Balbás en el retablo.

Sobre la anterior pintura se encuentra otro gran lienzo que lleva por nombre *La Asunción de la Virgen María* (Figura 7), también realizado por Juan Rodríguez Juárez, ésta alcanza 5.8 m de alto por 2.9 m de ancho y se eleva más arriba de las cornisas de las grandes columnas estípite, interrumpiendo el entablamento, y cuyo remate, con quebradas cornisas, angelillos y cortinajes, invade parte del casquete.



Figura 7. Lienzos de Juan Rodríguez. De izquierda a derecha *La Adoración de los Santos Reyes* y *La Asunción de la Virgen María*

Las esculturas de reinas están colocadas en pedestales, a nivel del sotabanco; de frente, en los extremos, o sea en las caras laterales, se encuentran repisas con tacones que sostienen las representaciones de santas: *Santa Margarita Reina* a la izquierda y *Santa Edita Princesa* a la derecha; ambas son de proporciones mayores que las naturales. Otras dos esculturas por lado y en iguales condiciones, se encuentran en los ejes de las columnas estípites de los retablos laterales; *Santa Elena Reina* y *Santa Isabel de Hungría* a la izquierda, mientras que a la derecha *Santa Isabel de Portugal* y *Santa Cunegunda Emperatriz*.

Al nivel del arranque de las grandes columnas estípites y frente a estas mismas, hay cuatro estatuas de reyes sobre repisas salientes sostenidas por elaboradas ménsulas, dos por lado: *San Hermenegildo* y *San Enrique* a la izquierda, *San Eduardo* y *San Casimiro* a la derecha. Como ya habíamos mencionado, en un nivel aun más alto y al centro de los retablos laterales, se levantan otras dos esculturas: *San Luis Rey de Francia*, por la izquierda y *San Fernando Rey de Castilla y de León* por la derecha en sus correspondientes especies de nichos.

Son doce en total las esculturas de santos, que a distintos niveles completan la ornamentación y el sentido simbólico del retablo.

La ornamentación por medio de frutas, hojarasca, óleos, conchas, cortinajes y demás molduras es de talla excelente, visto de este modo, se puede llegar a tener la sensación de que el retablo es en sí una escultura de innegable belleza y complejidad, digno ejemplo del concepto barroco.

2.3 Levantamiento estructural

El Retablo de los Reyes corre de muro a muro lateralmente, con 13.8 m de ancho, 8 m de fondo y unos 25 m de altura aproximadamente del piso del presbiterio hasta la bóveda.

Está formado por sesenta y nueve módulos hechos de madera, contemplando la concha como uno solo y las diez columnas estípites, los cincuenta y ocho módulos restantes son, en general, una disposición sucesiva de bastidores dobles con piezas diagonales, travesaños, tensores y entablamentos. Consta de tres cuerpos en sentido vertical; concha, cuerpo y predela (*Figuras 8 y 9*).

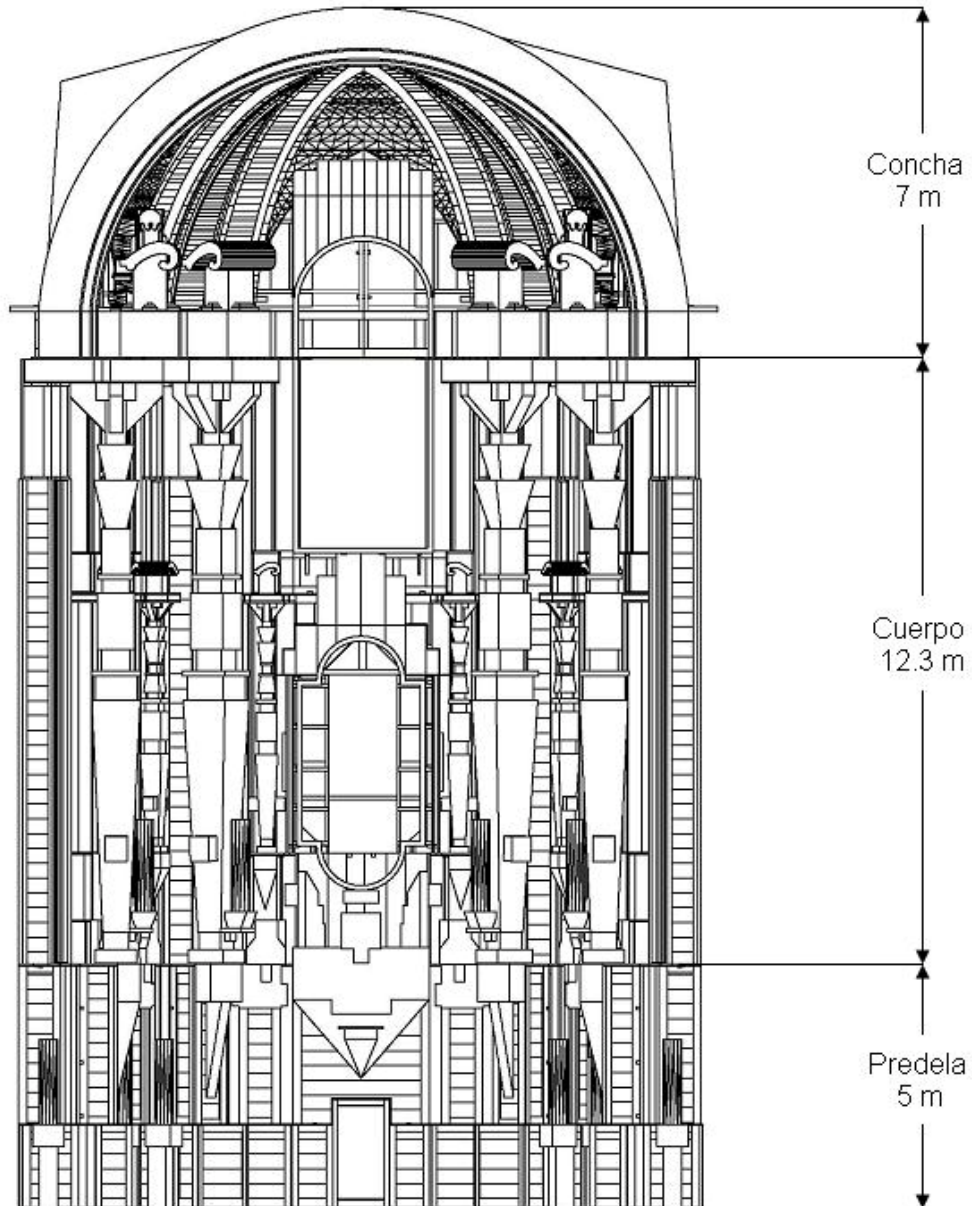


Figura 8. Vista frontal del modelo del Retablo de los Reyes

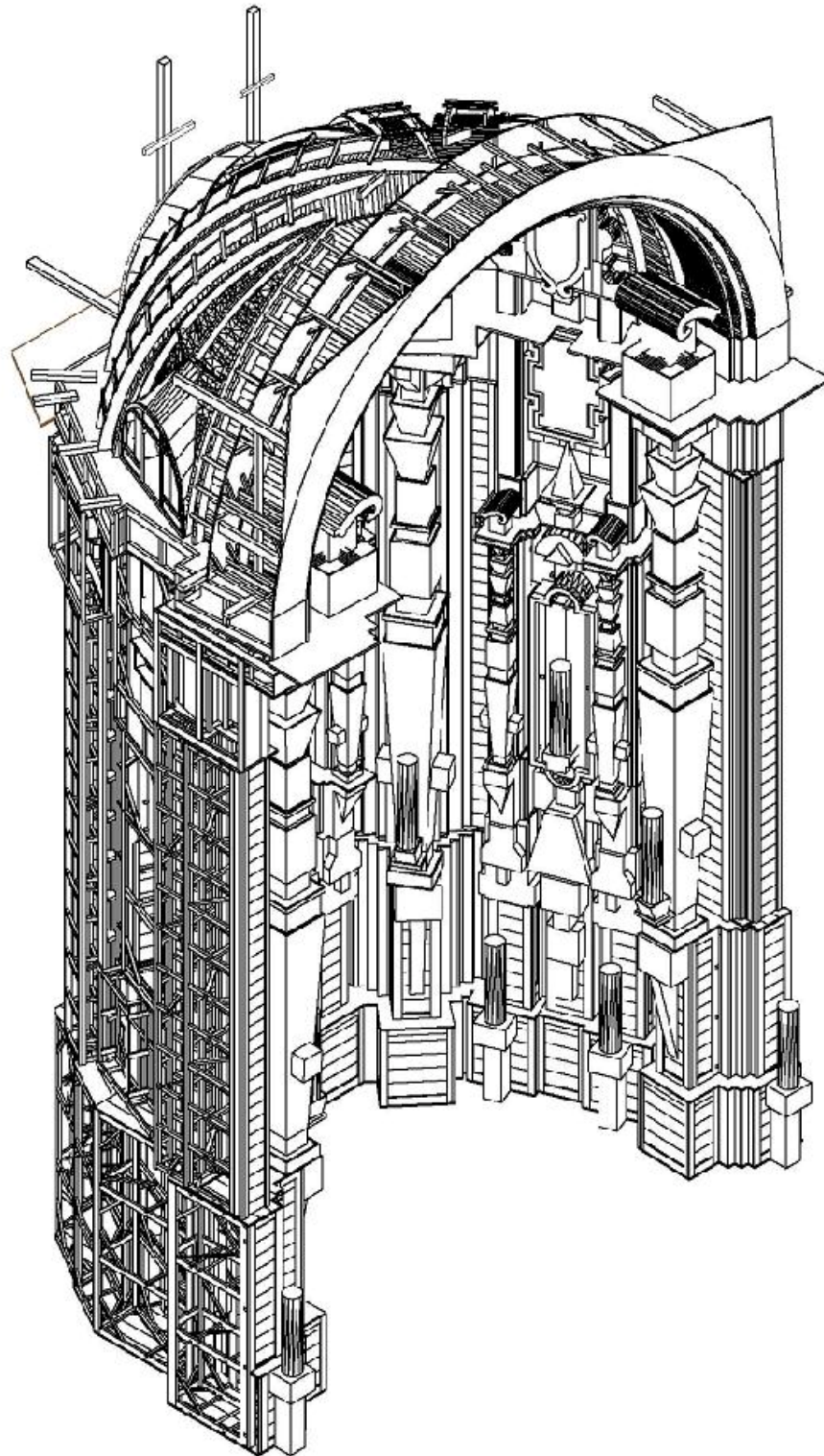


Figura 9. Vista suroeste del modelo del Retablo de los Reyes

2.3.1 Concha

La concha que es el remate del retablo, consta de un solo módulo con una altura de 7 m y cuenta con 25 columnas. La estructura de la concha unifica todo en lo alto, está formada por vigas curvas y laminadas logradas con tiras unidas una sobre otra hasta alcanzar las dimensiones y la curvatura que demanda el espacio de la bóveda, formando así paneles triangulares y curvos perfilados por secciones de molduras (*Figura 10*).

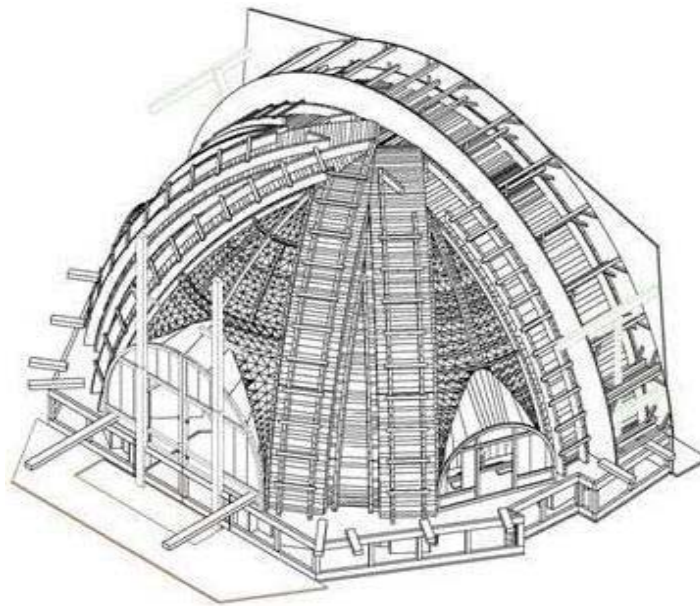


Figura 10. Vista noroeste del modelo de la concha

Este proceso constructivo es muy similar al de los barcos de madera construidos antes del siglo XIX, la madera adquiere flexibilidad por el tratamiento al vapor y se le da la curvatura con base en una plantilla previamente definida. *Lewis, (1985)* describe a detalle este interesante proceso.

La estructura de un barco tiene, por decirlo así, columna vertebral, una viga llamada “quilla”, ésta viga es longitudinal y está situada al fondo del barco; la nave adquiere su forma por medio de costillas transversales denominadas “cuadernas”, las cuadernas, en el caso de la concha, son las vigas curvas y laminadas que se encuentran en el extradós (*Figura 11*), a éstas se les colocan tablas horizontales

denominadas “tracas” que son tablones con juntas a tope calafateados para conseguir una superficie lisa en el intradós de la concha (*Figura 12*). Esta solución, producto de sólidos conocimientos de geometría y de técnicas constructivas, convierte la estructura en autoportante.

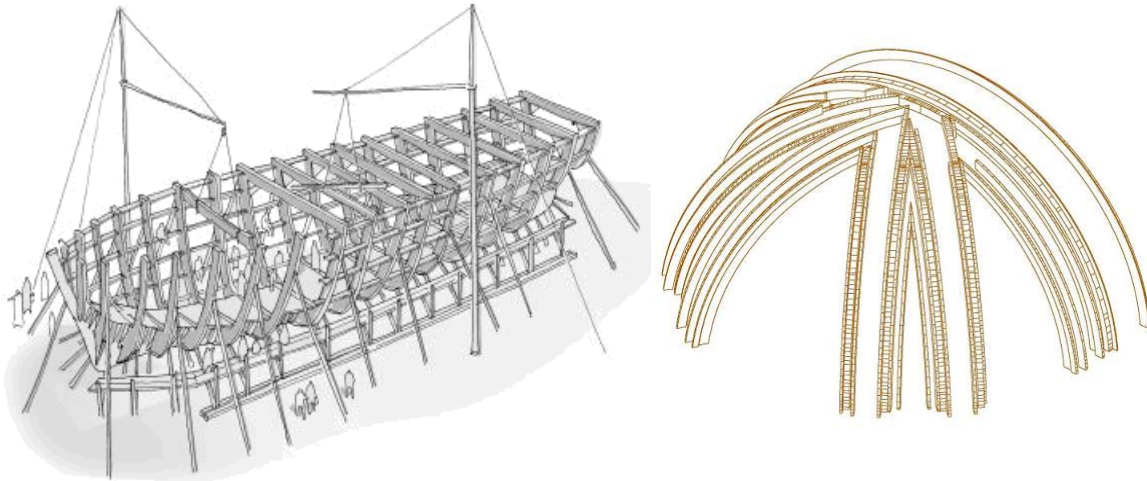


Figura 11. Comparación entre la quilla y las cuadernas de un barco con las vigas curvas de la concha del retablo

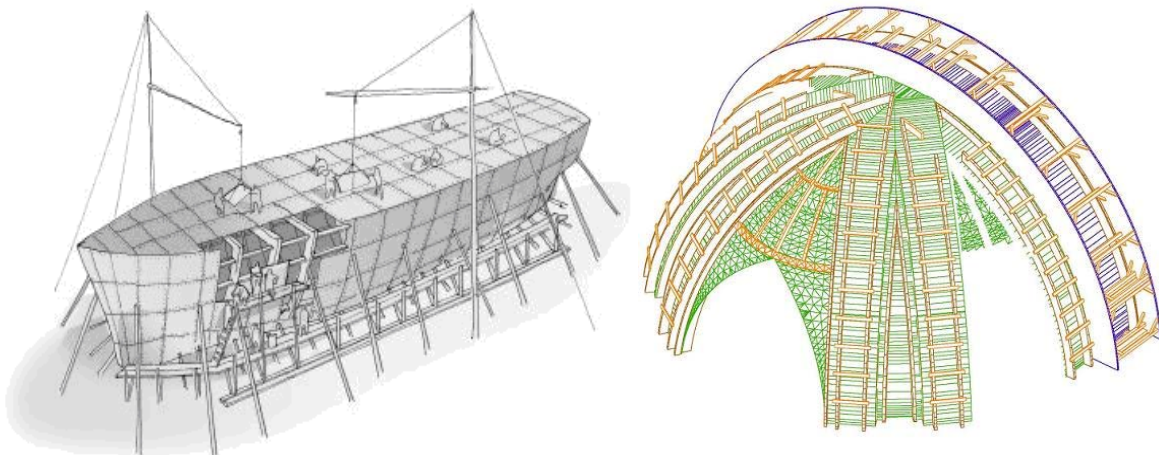


Figura 12. Las tracas dan forma al barco en su exterior, en el caso de la concha se colocan en el intradós para dar una superficie lisa

En las *Figuras 13 y 14* aparece el modelo tridimensional de la concha con nomenclatura de sus componentes.

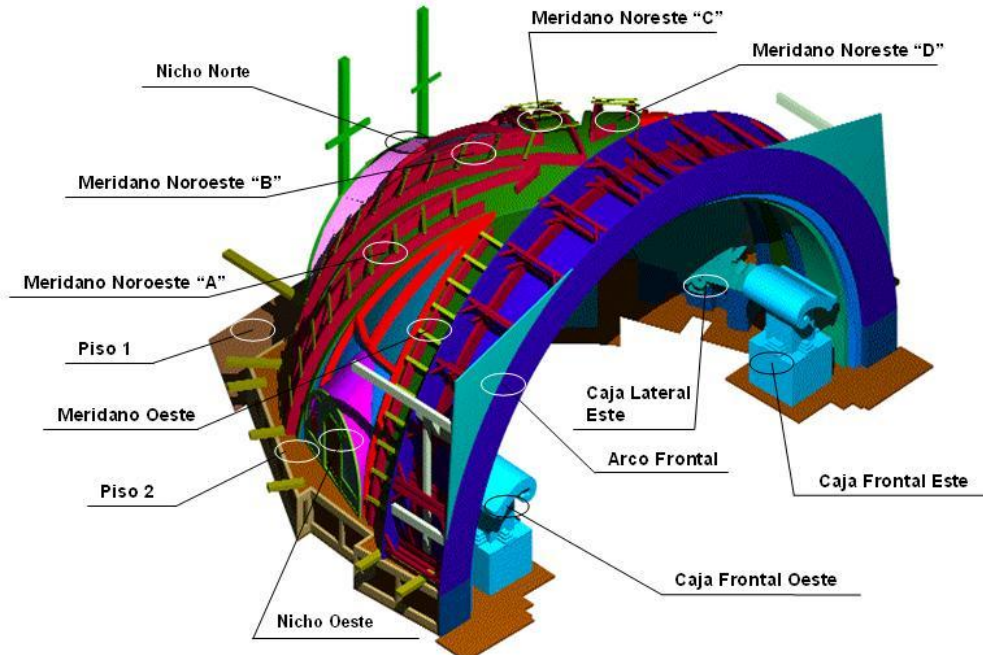


Figura 13. Vista suroeste de la concha

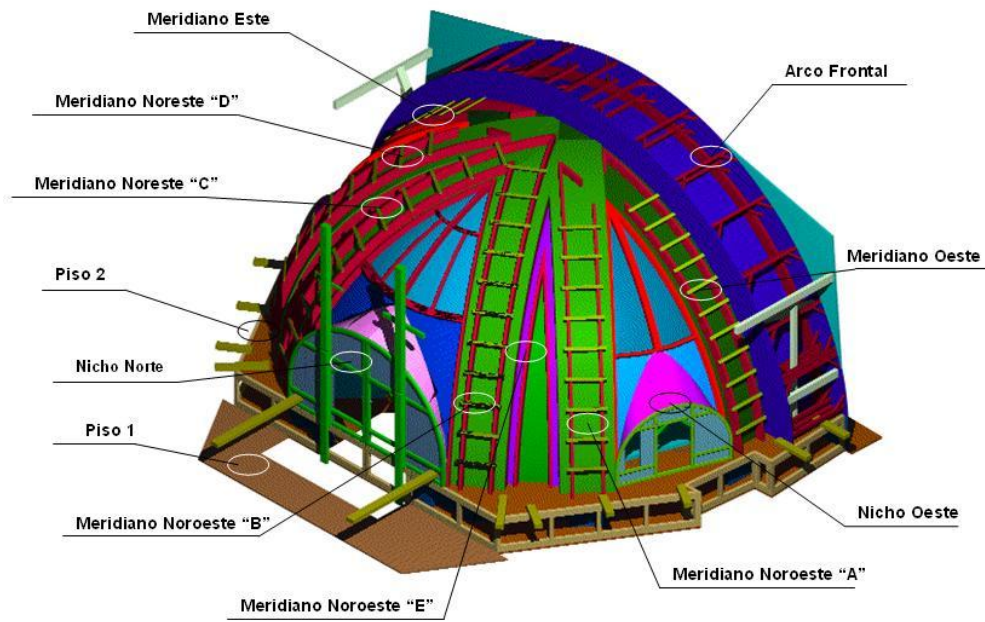


Figura 14. Vista noroeste de la concha

En las tablas 1, 2, 3 y 4 se muestran valores promedio de los elementos que integran el modelo estructural de la concha.

Tabla 1 Vigas curvas

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.16	0.07	7.5	6
0.16	0.16	9	4
0.23	0.07	8.4	16
0.25	0.16	8.7	16
0.28	0.04	9	4

Tabla 2 Vigas verticales

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.08	0.08	1.60	5
0.13	0.10	3.36	4
0.19	0.15	6.42	3

Tabla 3 Travesaños

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.07	0.05	0.4	80
0.08	0.03	0.9	70
0.08	0.08	1.7	50
0.08	0.08	2.2	20
0.10	0.08	0.6	45
0.10	0.02	1.5	14
0.17	0.08	2.1	25
0.20	0.10	1.7	10

Tabla 4 Tablones

Espesor [m]	No. de elementos
0.02	50
0.03	86
0.04	300
0.05	54

2.3.2 Cuerpo

Se denomina “cuerpo” a cada uno de los pisos o de las divisiones horizontales de un retablo. El cuerpo, con una altura de 12.3 m y 179 columnas, está constituido por seis esculturas de barones y reyes santos. En la calle central se ubican los dos principales óleos. También cuenta con cuatro grandes estípites, seis estípites pequeñas y 47 módulos. Aproximadamente la mitad de estos últimos tienen una configuración similar y el resto sólo conserva las mismas características constructivas. En las *Figuras 15 y 16* se incluyen dos imágenes con la nomenclatura de los módulos correspondientes al cuerpo y la predela del retablo en las que además puede apreciarse el arreglo que éstos guardan en la obra artística.

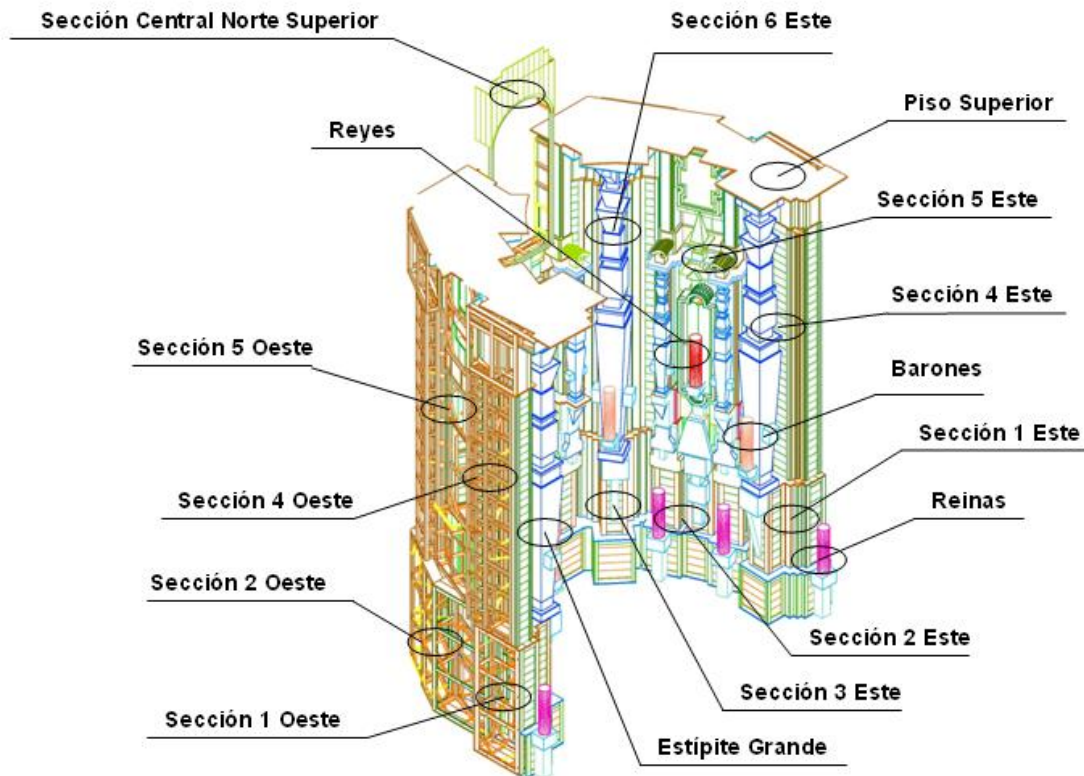


Figura 15. Vista suroeste del cuerpo y la predela

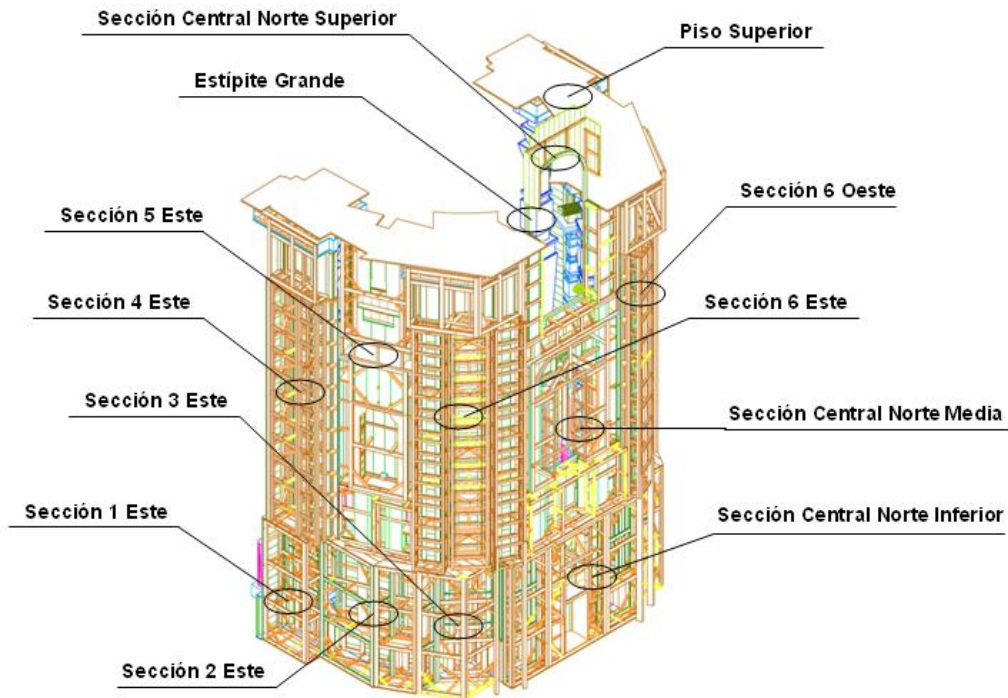


Figura 16. Vista noreste del cuerpo y la predela

En la *Figuras 17 y 18* aparecen imágenes correspondientes exclusivamente al cuerpo del retablo y a las distintas partes que lo integran.

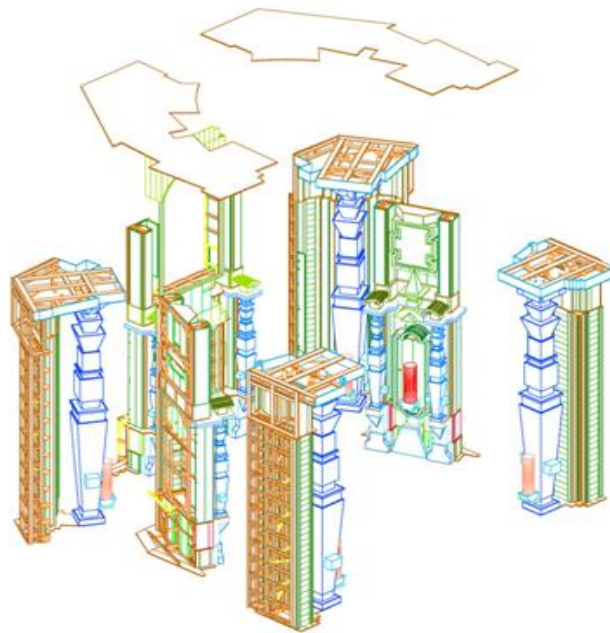


Figura 17. Vista suroeste del cuerpo



Figura 18. Vista noreste del cuerpo

El retablo es simétrico, cuenta con tres secciones de cada lado, más una sección central, en total suman siete secciones que conforman el modelo y su representación gráfica aparece en las *Figuras 19 a 23*.

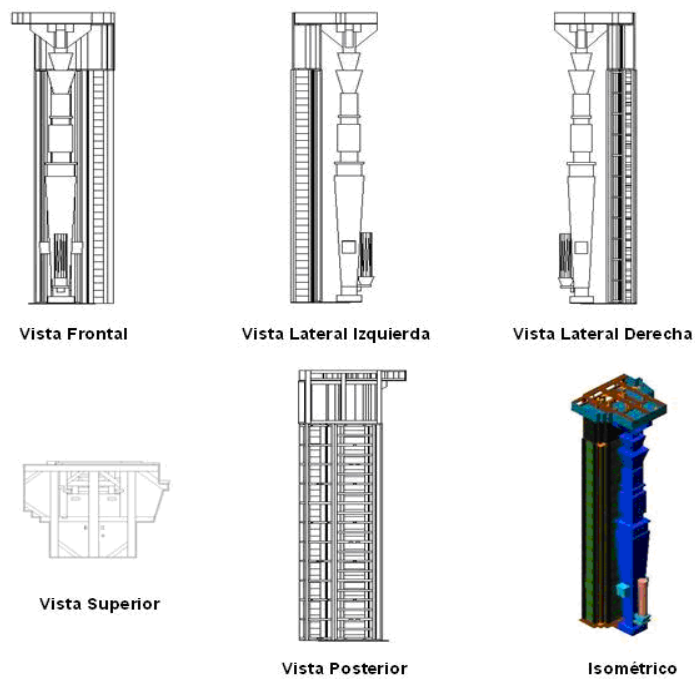


Figura 19. Sección 4 Este la conforman tres módulos y un estípite grande

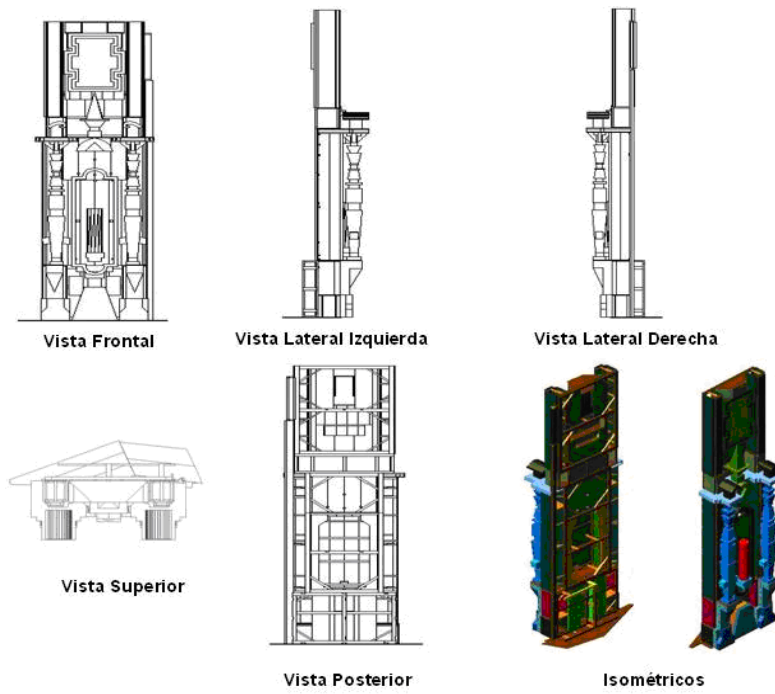


Figura 20. Sección 5 Este la conforman once módulos y dos estípites chicas

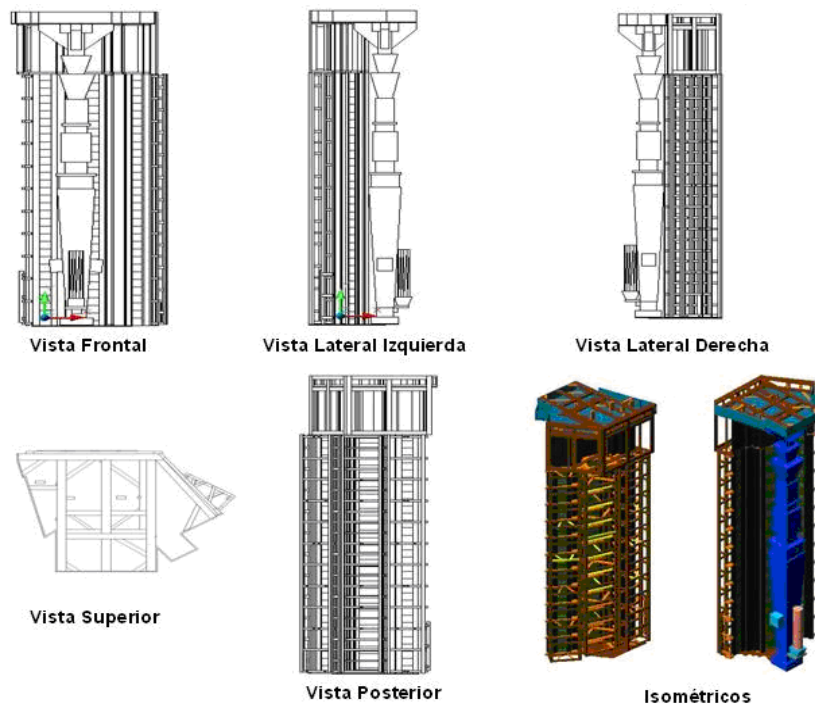


Figura 21. Sección 6 Este la conforman cuatro módulos y un estípite grande

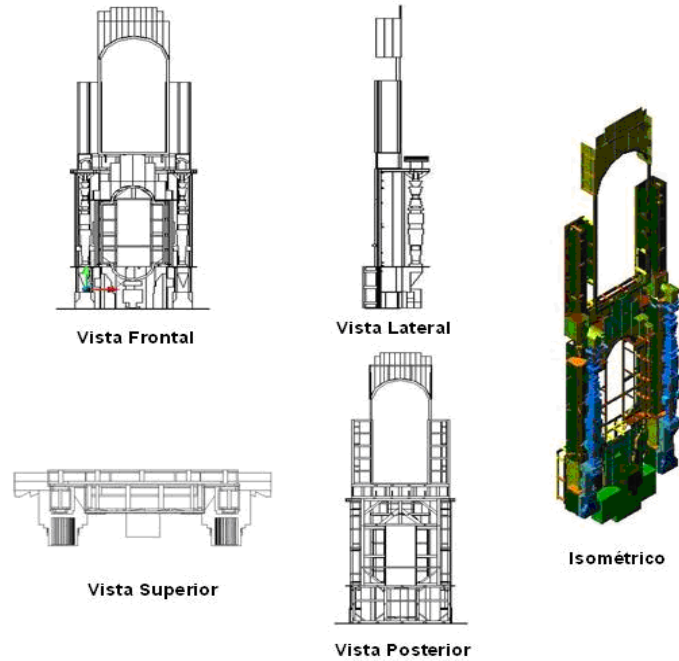


Figura 22. Sección central norte superior y media la conforman once módulos y dos estípites chicas

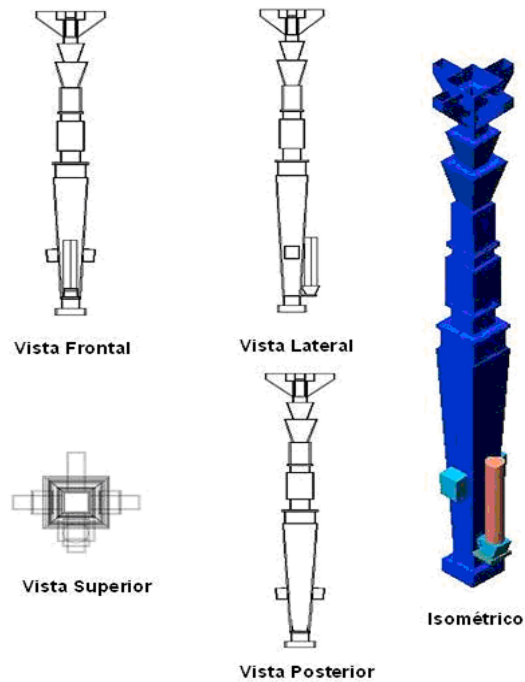


Figura 23. Columna estípite, la característica principal de este elemento es tener una pirámide invertida y truncada

2.3.3 Predela

Es la parte inferior de un retablo, está constituida por un sotabanco y una alta predela. Inicia del piso del presbiterio y llega a una altura de 5 m, cuenta con 96 columnas y contempla seis esculturas de reinas santas; en ella se observan los primeros once módulos, muy parecidos en forma y tamaño. En el centro de la predela se encuentra la entrada a la parte posterior del retablo.

En las tablas 5, 6, 7 y 8 se muestran los valores promedio de los elementos que integran un módulo típico de la predela.

Tabla 5 Columnas

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.09	0.05	4.9	7
0.12	0.10	4.9	4
0.14	0.10	1.8	4
0.17	0.05	4.9	7
0.18	0.06	4.9	4

Tabla 6 Diagonales

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.05	0.02	0.53	23
0.05	0.05	0.82	17
0.06	0.05	0.90	12
0.08	0.05	0.82	6

Tabla 7 Travesaños

Lado A [m]	Lado B [m]	Long. [m]	No. de elementos
0.14	0.05	0.50	16
0.14	0.05	1.60	11
0.16	0.06	0.95	6
0.20	0.15	0.20	1
0.22	0.10	1.70	1

Tabla 8 Tablas

Espesor [m]	No. de elementos
0.02	78
0.03	19
0.05	47

Una sucesión de bastidores con travesaños y diagonales, conectados entre sí con otras piezas similares, unidos con adhesivo conocido como “agua-cola” y cubiertos por tablas, son los elementos que forman un módulo típico de la predela (*Figura 24*).

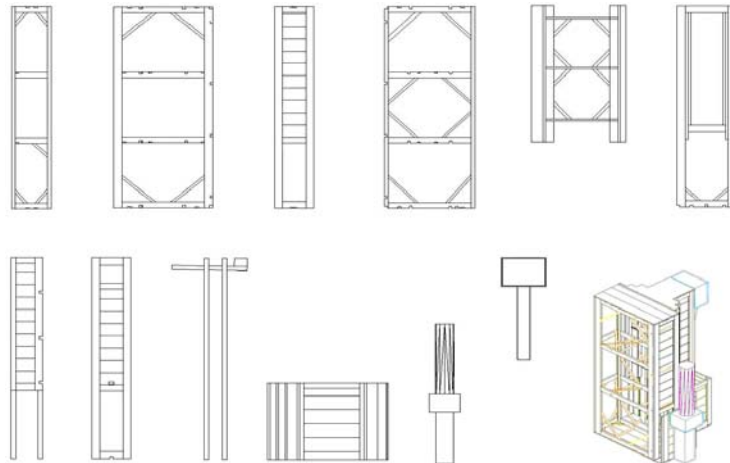


Figura 24. Elementos que forman un módulo típico de la predela

La predela consta de siete secciones, aquí también es notable la simetría del retablo, tres secciones de cada lado, más una sección central norte inferior cuya representación gráfica aparece en las *Figuras 25 a 28*.

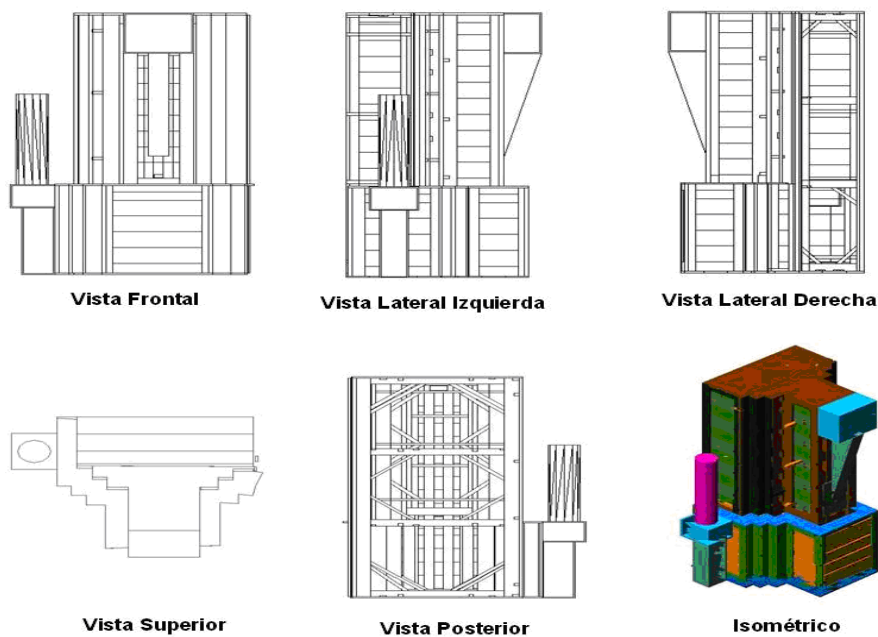


Figura 25. Sección 1 Oeste integrada por un solo módulo

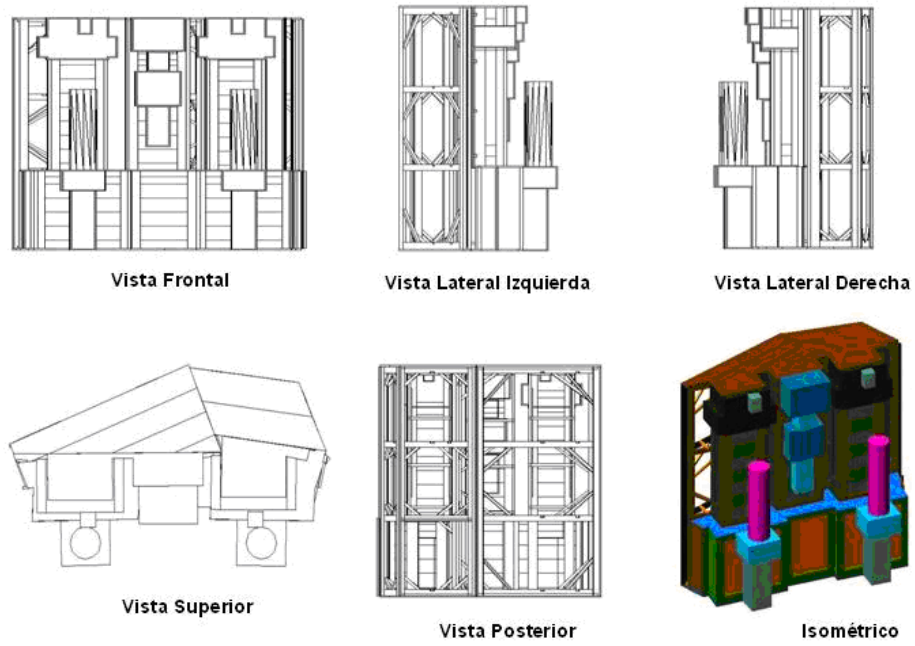


Figura 26. Sección 2 Oeste conformada por dos módulos

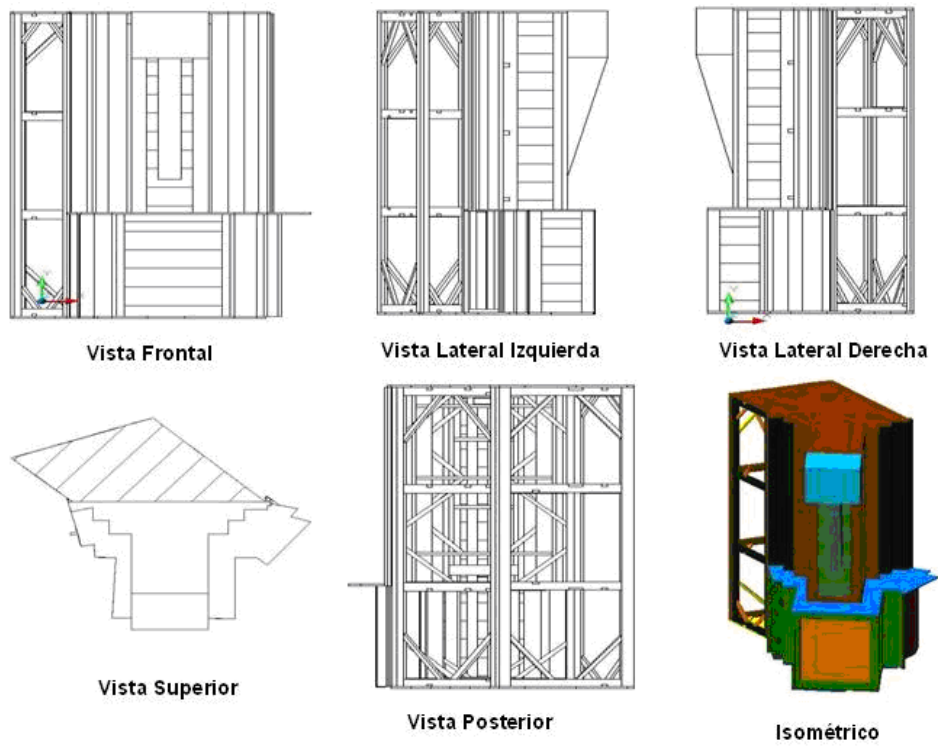


Figura 27. Sección 3 Oeste la conforma un solo módulo

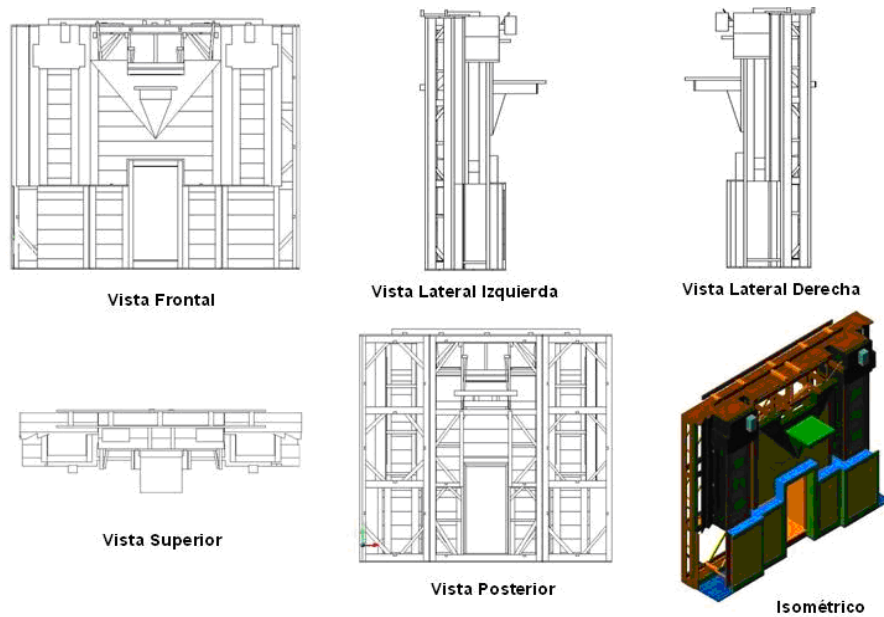


Figura 28. Sección Central Norte Inferior la conforman tres módulos

Las siguientes imágenes son de las secciones que integran la predela en conjunto, sobre ellas se encuentran las columnas estípites como referencia (*Figura 29 y 30*).

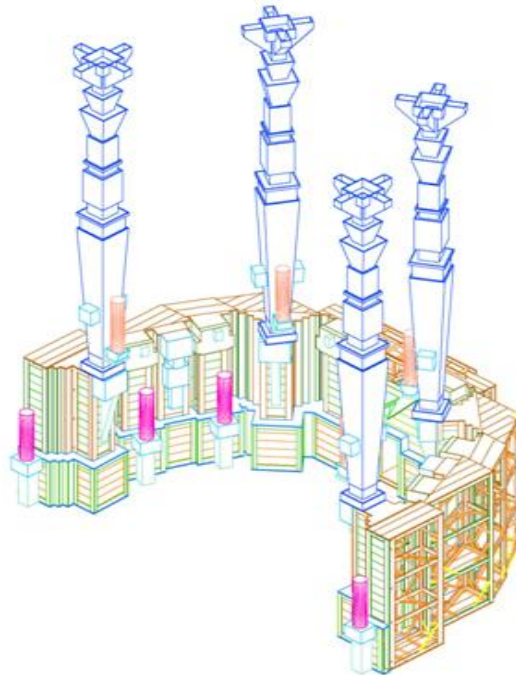


Figura 29. Vista sureste de la predela

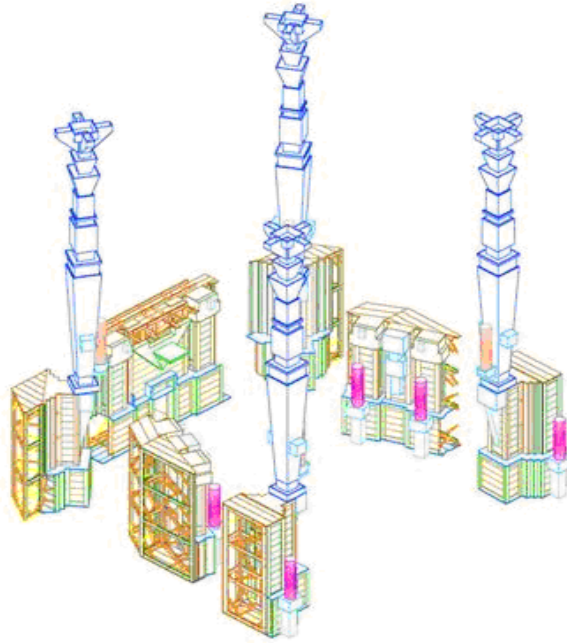


Figura 30. Vista suroeste de la predela

3. DAÑOS E INTERVENCIONES

A través de su historia, la Catedral Metropolitana ha pasado por diversas vicisitudes, sin embargo, aquella que más afectó sus bienes artísticos fue la ignición del 17 de enero de 1967. La causa del fuego fue la pésima calidad de la instalación eléctrica, así como la inadecuada vigilancia nocturna; este incendio destruyó parte del Retablo del Perdón (*Figura 31*), las sillas del Coro (*Figura 32*) y los órganos; por su parte, el Retablo de los Reyes resultó seriamente dañado (*Tovar de Teresa, 1985*).

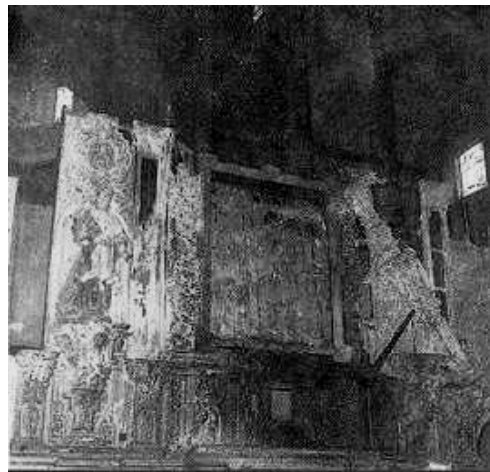


Figura 31. Vistas parciales de los daños en el Retablo del Perdón, después del incendio de 1967



Figura 32. Vista del coro, después del incendio de 1967

3.1 Intervención de 1940

El estado de conservación del Retablo de los Reyes ha sido tema de preocupación desde el momento en que concluyó su construcción, motivo por el cual a partir del siglo XX, se inició una campaña de múltiples intervenciones para preservar su integridad.

Tovar de Teresa (1985) hace una breve referencia a tres intervenciones hechas al Retablo de los Reyes hacia 1940. En el campo de lo artístico, se llevó a cabo la restauración y consolidación del lienzo *La Asunción de la Virgen María*; ese mismo año, pero en el ámbito arquitectónico, se restauró el basamento de arranque del retablo.

La parte estructural del retablo también ha recibido atención, ejemplo de ello fue la acción tomada al notar por medio de levantamientos de los elementos portantes y de la geometría de la estructura, un desplazamiento de la concha hacia el frente.

Dicha acción consistió en colocar varios tensores metálicos rígidos principalmente en miembros de carácter secundario, es decir, en vigas curvas de soporte de los paneles ornamentales (*Figura 33*).



Figura 33. Tensores metálicos rígidos que ligan la concha a la bóveda del ábside

3.2 Intervención de 1981

Para 1969 la preocupación por la restauración y conservación de la obra se acrecentó con motivo de los daños causados en el mueble por el incendio ocurrido en enero de 1967.

La intervención de 1981 fue descrita minuciosamente por *Tovar de Teresa (1985)*, quien afirma fue una de las más importantes obras de conservación del patrimonio cultural de México, y considera que este retablo es una obra fundamental para la comprensión del arte barroco americano, a continuación y de manera sucinta se destacan algunos de los principales detalles de esta intervención.

3.2.1 Levantamiento de daños

Para 1981 el deterioro del retablo era sumamente alarmante. Los efectos de la absoluta falta de limpieza eran evidentes. En el espacio existente entre la parte

posterior del retablo y el muro del ábside había grandes acumulaciones de polvo y basura, restos de roedores, palomas muertas y deyecciones de las mismas, esto contribuía a la proliferación de insectos xilófagos (organismos que se alimentan de los principales componentes de la madera como celulosa) y hongos, precipitando así la degradación de la madera causada por carcinoma; incluso en algunas tablas los agujeros de estos insectos eran tan profundos que llegaron a la parte frontal del retablo y dañaron la hoja de oro.

Asimismo se encontraban áreas con problemas de inestabilidad estructural debido a la pérdida de piezas primarias y secundarias de la estructura. La falta de limpieza también se hacía evidente en la fachada, el polvo y el humo de las veladoras, cirios e inciensos, causó opacidad en muchos de los elementos; en algunas partes esto se tradujo en verdaderas manchas oscuras sobre el dorado (*Figura 34*).



Figura 34. Opacidad en la parte frontal del retablo, debida al polvo y humo de los cirios y veladoras

Además de la falta de cuidado en el aseo del retablo eran notorios los siguientes aspectos: las abrasiones y otros efectos del calor ocasionados por el incendio de 1967 produjeron en un importante porcentaje de las áreas del retablo

ampollamientos y burbujas, deformaciones que afectaban la continuidad y los valores plásticos de las capas doradas de los acabados, daños en relieves y molduras, golpes en el basamento y un gran deterioro del material pictórico y de las esculturas.

La concha, por su parte, era el elemento más dañado, pues todo el aire caliente y el humo del incendio, se concentró en ella, provocando que la desecación del material que constituye la base de preparación de la hoja de oro fuera tan brusca con el alza de la temperatura que al perder su humedad natural, se contrajo originando así numerosos ampollamientos.

3.2.2 Proceso de restauración

El primer paso se dio en la limpieza general del retablo, desde la aspiración del polvo hasta el retiro de materia orgánica. El aseo se inició por la parte posterior en donde se hizo limpieza general de todas las vigas y tablas, así como el tratamiento de los daños y desperfectos existentes en las mismas y la aplicación de sustancias químicas como medida profiláctica para la conservación de la madera, previendo en esto cualquier efecto negativo sobre la base de hoja de oro cuando la solución fuese absorbida. Luego de la limpieza general de las partes frontal y posterior se procedió a la restauración de las pinturas y esculturas dañadas principalmente por el incendio ocurrido en 1967.

3.3 Daños en el retablo registrados en 1989

En 1989 fueron localizados varios sectores de la catedral con grandes problemas de infiltración de agua de lluvia, principalmente en la bóveda que cubre el presbiterio y, sobre todo, en el Retablo de los Reyes (*Cortés et ál., 2006*). El agua llegó ahí por medio de grietas surgidas de los asentamientos diferenciales de la catedral que causaron daños significativos en la parte posterior del retablo.

3.4 Estado del retablo en 2002

La concha que integra el remate presenta tensiones importantes en la zona de contacto entre el mueble y el intradós de la bóveda (*Figura 35*); este elemento es el más dañado pues los tensores rígidos colocados en 1940 no se adaptaron a los movimientos de la estructura y provocaron la rotura de algunos paneles triangulares y del arco principal de la concha.

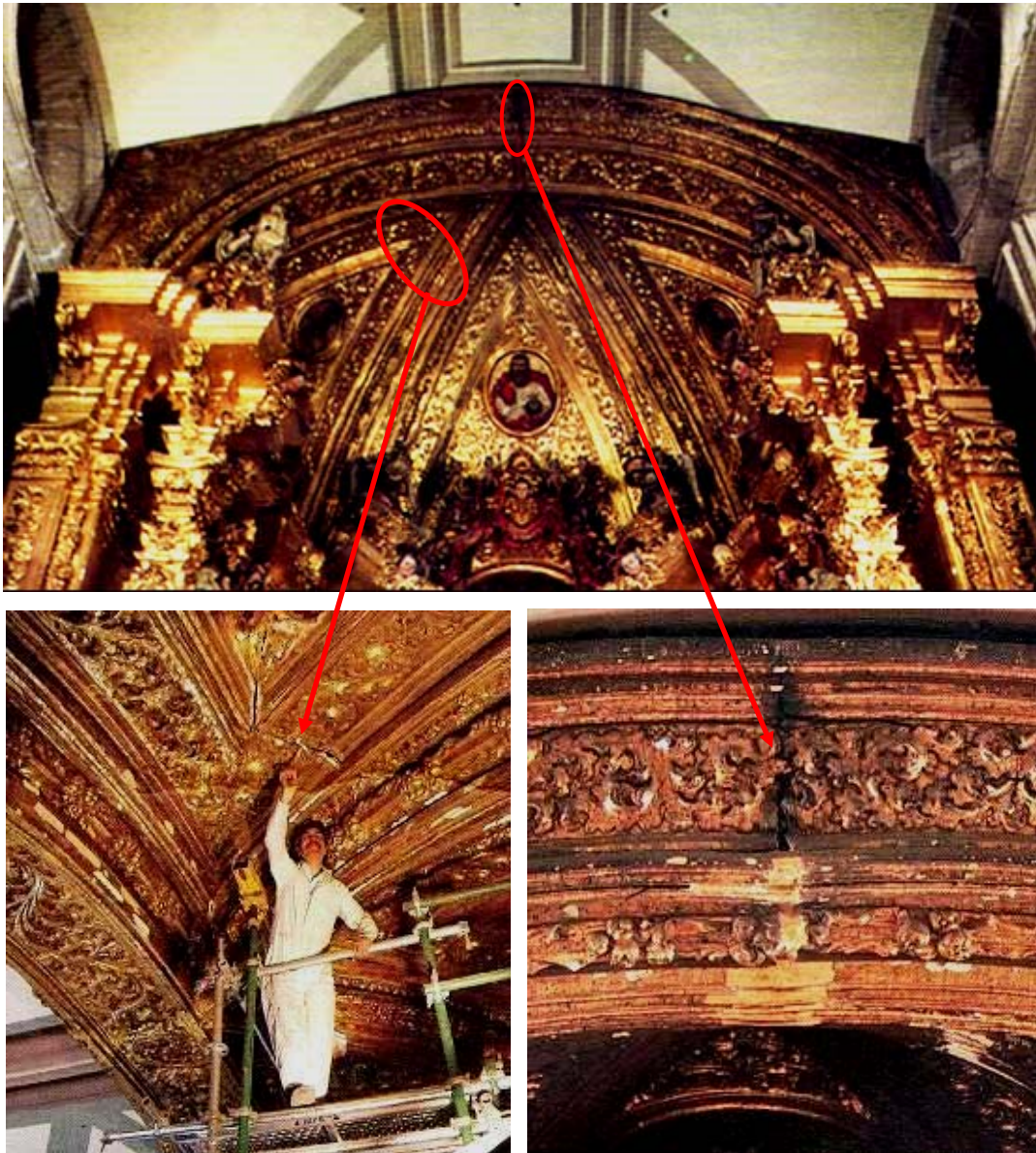


Figura 35. Fracturas en sectores de la concha y en el arco principal

La estructura vertical (cuerpo del retablo) muestra algunos efectos debido a los desplazamientos diferenciales, es decir, movimientos distintos del retablo y de la estructura del edificio (*Figura 36*).



Figura 36. El hundimiento diferencial de la catedral provocó fracturas en el retablo

Las columnas estípites se encuentran en buen estado a pesar de haber sido expuestas a la acumulación de polvo y a la pérdida parcial de algunos de sus acabados en oro.

Las esculturas se encontraban mutiladas y presentaban fuertes lesiones causadas por los insectos y la acumulación de polvo y suciedad (*Figura 37*).

La decoración presentaba desprendimientos de la base que sujeta la aplicación de la hoja de oro al soporte; estos daños fueron subestimados, por lo que no se atendieron totalmente en la intervención anterior.

Ante el lamentable estado del retablo, la acción inmediata para la conservación y restauración del mismo fue primordial. El examen que sirvió para evaluar el estado de una obra artística tan compleja, como lo es el Retablo de los Reyes, requirió

observaciones estructurales, arquitectónicas y artísticas. Este aspecto hizo necesaria la participación de un completo equipo multidisciplinario.



Figura 37. Esculturas mutiladas y opacidad de las mismas debido al polvo y al humo de cirios

3.5 Intervención al retablo entre 2003 y 2006

Esta intervención ha sido una de las acciones de mayor envergadura a las que se ha visto sometido el Retablo de los Reyes para preservar su integridad. Los principales aspectos relacionados con esta última intervención fueron documentados por *Cortés et ál. (2006)*.

Si bien después del incendio de 1967 el retablo y sus colaterales fueron objeto de una intervención realizada con el fin de estabilizar sus secciones más lastimadas, esa tarea no logró ser de carácter integral pues quedaron sin recibir atenciones una gran cantidad de piezas deterioradas. Aquellos daños se incrementaron tanto por los efectos de la acumulación de polvo y basura, como por la infiltración de agua pluvial a través de grietas surgidas de los asentamientos diferenciales de la catedral y sismos de gran intensidad.

El nuevo proyecto de restauración del retablo incluyó: un levantamiento arquitectónico minucioso que permite registrar las proporciones y medidas del retablo de una forma exacta; un análisis químico de los materiales que constituyen el mueble; el estudio de los deterioros existentes y la formulación de los procedimientos más adecuados para su intervención.

3.5.1 Primera etapa del proyecto

Como primera etapa de intervención del retablo se diseñó y construyó un andamio de alta seguridad adecuado a las formas del retablo para llevar a cabo la fumigación; la limpieza en seco con apoyo de productos químicos, aspiradoras y brochas; la consolidación de la base de preparación y de los dorados del retablo; la eliminación de las ampollas y la recuperación de los niveles de las superficies que fueron afectadas por el calor que produjo el incendio; la reintegración de los acabados con hoja de oro de 23.5 kilates sobre medios especialmente preparados y la consolidación y corrección de las zonas terminadas en policromía.

3.5.2 Segunda etapa del proyecto

La restauración de los óleos se llevó a cabo según lo recomiendan las normas y los procedimientos más respetuosos, entre los que se cuentan la consolidación de los soportes de las pinturas, la instalación de nuevas telas de apoyo y la reintegración de dorados antes de la aplicación de barnices.

3.5.3 Tercera etapa del proyecto

El Retablo de los Reyes ha sido objeto de varios análisis a partir del levantamiento arquitectónico de su fachada, uno de ellos fue el estudio detallado de la parte superior del mismo, labor que se ha integrado con la participación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se llevó a cabo un análisis geométrico de la concha, los

resultados determinaron un nuevo sistema de tensores ajustables que fueron colocados en puntos estratégicos de la concha y la cúpula (*Figura 38*).



Figura 38. Tensores ajustables en el extradós de la concha

3.5.4 Daños pendientes por atender en la parte posterior del retablo

También es importante mencionar que la intervención humana ha sido otra causa directa del deterioro del retablo y una complicación más para su conservación, ejemplo de ello es la instalación eléctrica que pasa por encima y entre las vigas principales, secundarias y tablas, las cuales fueron atornilladas, ranuradas y en algunos casos perforadas a fin de fijar la red eléctrica (*Figura 39*).

Tampoco ha podido erradicarse del todo la constante acumulación de basura conformada por sobrantes de distintos materiales como cables, cinta de aislar y lazos, así como envases de refresco e incluso colillas de cigarro (*Figura 40*).

Asimismo debe ponerse especial atención a las vigas y tablas de madera faltantes y a las que están seriamente dañadas en la parte posterior del retablo, ya que el progreso de estos deterioros puede ocasionar inestabilidad estructural del retablo (*Figuras 41, 42 y 43*).



Figura 39. Rotura de viga en elemento secundario y abertura de ventana en elemento primario para el paso de la instalación eléctrica



Figura 40. El casi nulo mantenimiento ha traído como resultado la acumulación de basura



Figura 41. Elementos estructurales fracturados



Figura 42. Deterioros en elementos estructurales causados por insectos xilófagos



Figura 43. Elementos estructurales faltantes

4. MODELO ANALÍTICO

4.1 Aspectos generales

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento estructural del Retablo de los Reyes ante la acción de su peso propio y el efecto de los sismos.

Dada la importancia de las condiciones de apoyo en el comportamiento de la estructura y, considerando el deterioro y los desajustes que presentan los elementos de anclaje del retablo, se estudió el comportamiento de la estructura asumiendo dos condiciones de apoyo: la primera, asume que la estructura se apoya exclusivamente en su base; la segunda, además considera los anclajes del cuerpo principal hacia el muro del ábside y los soportes que unen la concha a la bóveda del presbiterio.

Para estudiar el comportamiento estructural del retablo se desarrolló un modelo aplicando el método de los elementos finitos, dada la experiencia positiva que se ha obtenido en la aplicación de dicho método para la revisión de otras estructuras similares.

4.2 Método de los elementos finitos

En la actualidad, el método de los elementos finitos constituye una poderosa herramienta para el análisis estructural. Con el desarrollo de las computadoras y la creación de algoritmos eficientes, dicho método ha tomado gran importancia en diversos campos de la ingeniería.

Anteriormente la limitante principal del método había sido el obtener la solución de grandes sistema de ecuaciones diferenciales, lo que hacia muy lento e ineficaz su uso; sin embargo, con los nuevos procesadores y memorias que integran los actuales equipos de cómputo se ha solventado de manera eficiente esta dificultad.

El método consiste en dividir la estructura en subregiones denominadas elementos finitos, estas subregiones se definen por un número discreto de puntos llamados nodos, a través de los cuales se establece la conexión entre las diferentes subregiones en las que fue dividida la estructura, y sobre estos nodos se formulan las principales incógnitas del problema. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (con infinitos grados de libertad) que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito que puede modelarse mediante un sistema de ecuaciones lineales o no lineales (*Zienkiewicz et ál., 1987*).

Es así como se determina la matriz de rigideces local de cada elemento finito, las ecuaciones que se obtienen se acoplan para formar un sistema de ecuaciones general para toda la estructura; el sistema se resuelve de manera numérica y como resultado se obtiene el campo de desplazamientos.

$$[K]\{\Delta\} = \{F\}$$

Donde **K** es la matriz de rigideces,
Δ es el vector de desplazamientos
y **F** es el vector de fuerzas.

4.3 Propiedades mecánicas del material

Para el análisis de la estructura es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales con los que ésta fue construida. Para ello, de un elemento secundario del retablo se extrajo una muestra de madera, de la que se obtuvieron cinco probetas para estimar el peso volumétrico, el módulo de elasticidad y la resistencia de la madera tanto a compresión como a tensión de conformidad con las normas ASTM D 143-94. Dadas las características artísticas y la importancia histórica de la estructura no fue posible obtener un número mayor de muestras.

Prueba de compresión simple. Para esta prueba se realizaron dos probetas con la geometría que aparece en el *Figura 44*; cada una de ellas se sometió a una carga monotónica de compresión hasta alcanzar su resistencia. La prueba se realizó en una maquina universal y durante su desarrollo se dio seguimiento a la fuerza que se aplicó a la probeta mediante una celda de carga integrada a la propia máquina, también se registró el desplazamiento que ésta experimentó con el apoyo de dos DCDT, cuya señal eléctrica se llevó a un sistema de adquisición de datos y de ahí a una computadora personal. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9, y en la *Figura 45* aparece una curva esfuerzo-deformación correspondiente a la probeta 1.

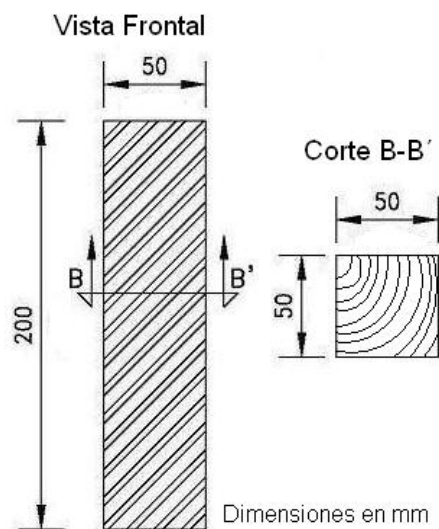


Figura 44. Probeta para la prueba de compresión simple

Tabla 9 Resultados de la prueba de compresión simple

Probeta	Carga máxima [kg]	Esfuerzo máximo [kg/cm ²]	Modulo de Elasticidad [kg/cm ²]
1	13403	505	107305
2	13300	508	*

*En esta probeta sólo se determinó la resistencia

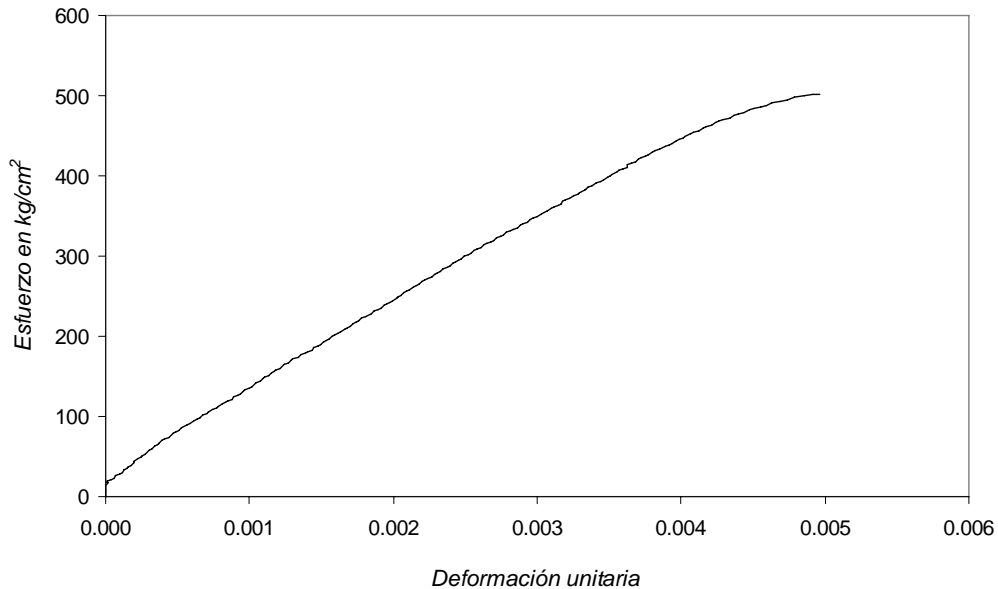


Figura 45. Curva esfuerzo-deformación obtenida en la prueba de compresión simple

Prueba de Tensión. Dos probetas con la geometría que aparece en el Figura 46 fueron sometidas a una carga monótonica de tensión hasta alcanzar su resistencia. La prueba también se realizó en la máquina universal y durante su desarrollo se dio seguimiento a la fuerza que se aplicó a las probetas y a la deformación que éstas experimentaron.

El sistema de monitoreo para dar seguimiento al comportamiento de la probeta fue el mismo que se usó para la prueba de compresión. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10, y en la Figura 47 aparecen las dos curvas esfuerzo-deformación obtenidas.

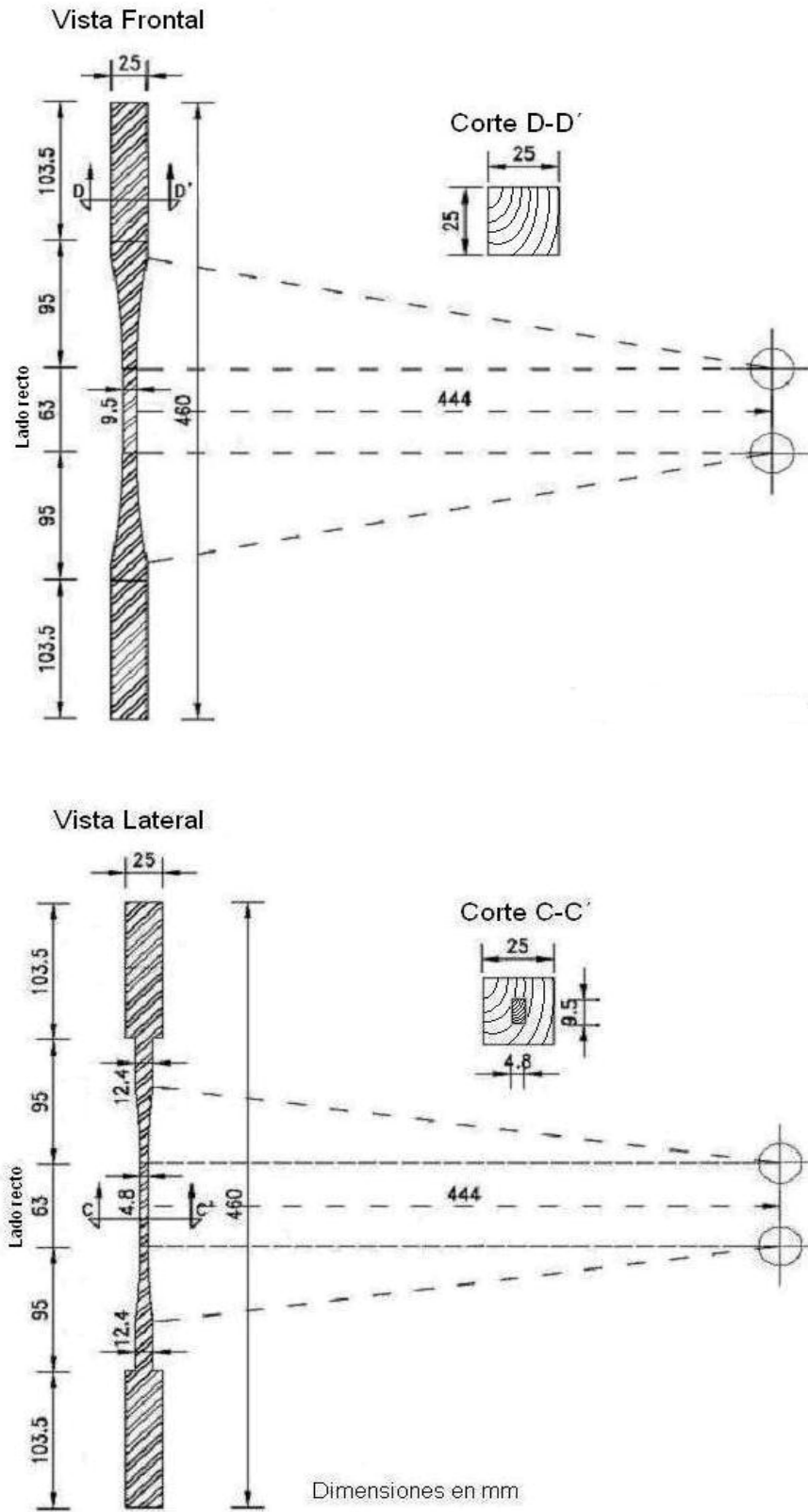


Figura 46. Probeta para la prueba de tensión

Tabla 10 Resultados de la prueba de tensión

Probeta	Carga máxima [kg]	Esfuerzo máximo [kg/cm ²]	Modulo de Elasticidad [kg/cm ²]
1	456	786	90859
2	373	776	95551

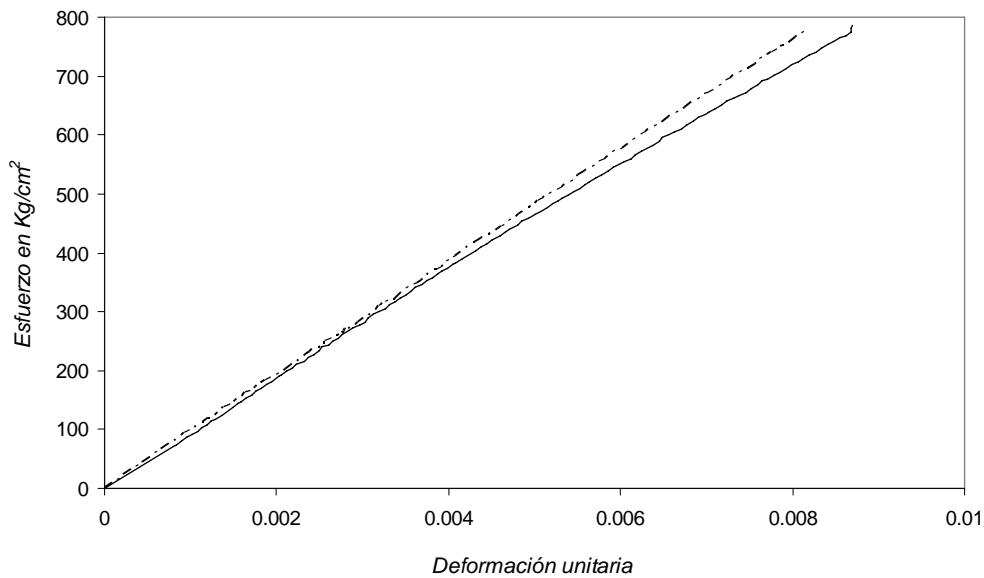


Figura 47. Curva esfuerzo-deformación obtenida en prueba de tensión. Probeta 1 línea continua, probeta 2 línea punteada

Prueba de flexión. Esta prueba se realizó sobre una viga simplemente apoyada, la cual fue sometida a una carga concentrada al centro del claro. En la *Figura 48* se muestra la geometría de esta probeta y la disposición de la prueba se ilustra de manera esquemática en la *Figura 49*. La aplicación de la carga se efectuó con la máquina universal y el seguimiento del comportamiento estructural de la viga durante el desarrollo de la prueba se realizó con el mismo sistema de monitoreo de las pruebas anteriores.

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de flexión y en la *Figura 50* aparece la curva carga-desplazamiento correspondiente.

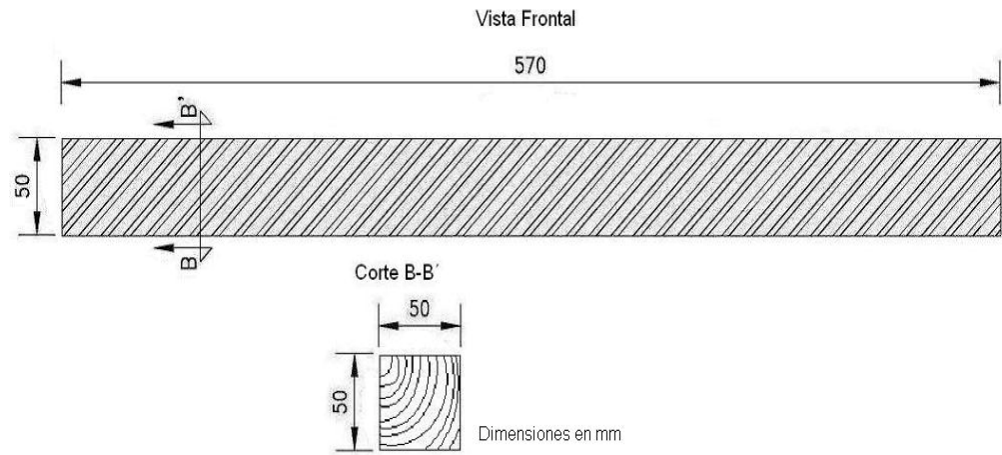


Figura 48. Probeta para la prueba de flexión

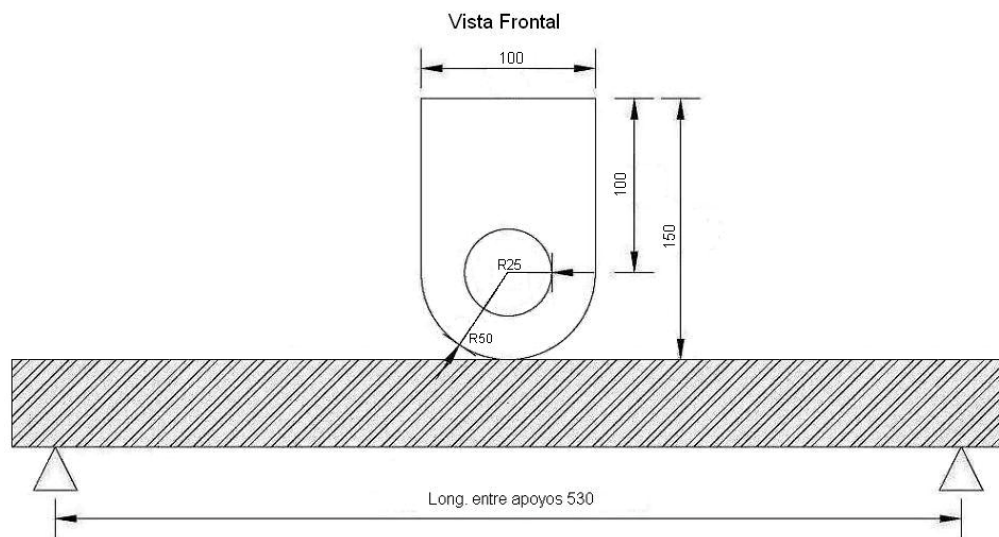


Figura 49. Disposición de la probeta para la prueba de flexión

Tabla 11 Resultados de la prueba de flexión

Probeta	Carga máxima [kg]	Desplazamiento máximo [mm]
1	1258	16

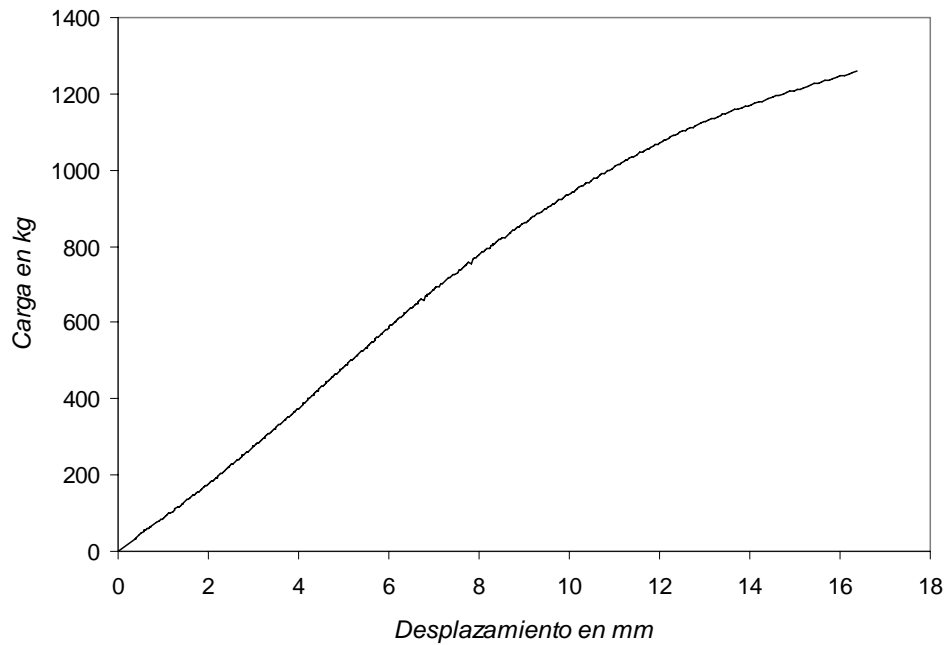


Figura 50. Curva carga-desplazamiento obtenida en prueba de flexión

Para el análisis de la estructura, que más adelante se describe, se tomaron como referencia los datos que aparecen en la tabla 12.

Tabla 12 Propiedades de la Madera

Material	Peso Volumétrico [kg/m ³]	Módulo de Elasticidad [kg/cm ²]	Módulo de Poisson
Cedro Blanco	433	107305	0.30

4.4 Descripción general del modelo analítico

Debido a la complejidad de la estructura, se tomó la decisión de primero realizar el modelo en *Autocad* para después exportarlo al programa de análisis estructural. El modelo fue analizado utilizando el programa *SAP2000*.

En general, el modelo consta de 10374 nodos, 7079 elementos barra (*Frame*, elementos en tres dimensiones para idealizar barras y marcos, cada elemento se define con dos nodos) y 8388 elementos placa (*Shell*, elementos en tres dimensiones para idealizar placas, cada elemento se define con cuatro nodos).

El modelo analítico del retablo tiene una altura de 24.3 m y su base cubre un área de 36.4 m² (*Figuras 51 y 52*).

El peso de la mayoría de las esculturas tales como ángeles, reyes, reinas, y barones aparece en la tabla 13 y fue tomado en cuenta mediante cargas puntuales en sus respectivos lugares. En cambio, el peso de óleos, querubines, cornucopias y demás motivos ornamentales menores se incluyó en el peso volumétrico de la madera.

Tabla 13 Pesos aproximados de esculturas y elementos decorativos

Elemento	No. de piezas	Peso aprox. [kg]
Reyes	2	198
Reinas	6	534
Barones	4	368
Ángeles	8	364
Motivos decorativos y ornamentación	varios	1569
Total		3033

El modelo está apoyado en 20 puntos al nivel del arranque de la concha; en dos puntos ubicados en los extremos del arco principal; en dos vigas verticales localizadas en la parte posterior de la concha y que se elevan hasta empotrarse en la cúpula; y en toda su base. Los puntos de apoyo restringen exclusivamente los desplazamientos en tres direcciones.

El modelo analítico, al igual que el modelo tridimensional, se divide en tres cuerpos, mismos que se describen a continuación.

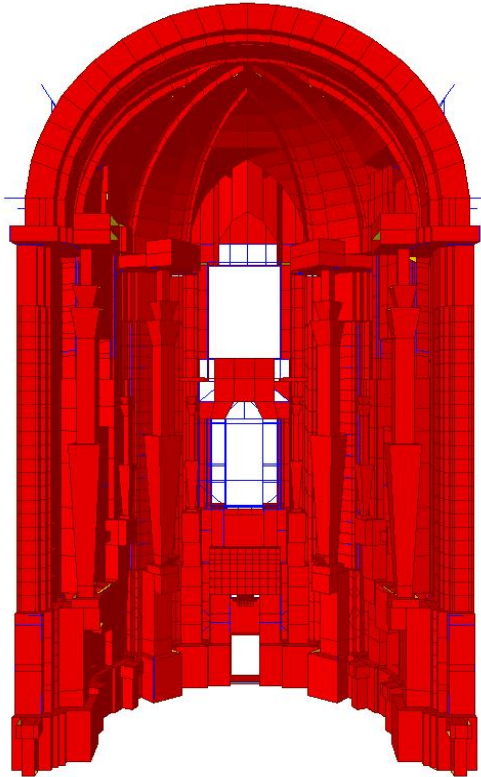


Figura 51. Vista frontal del modelo analítico

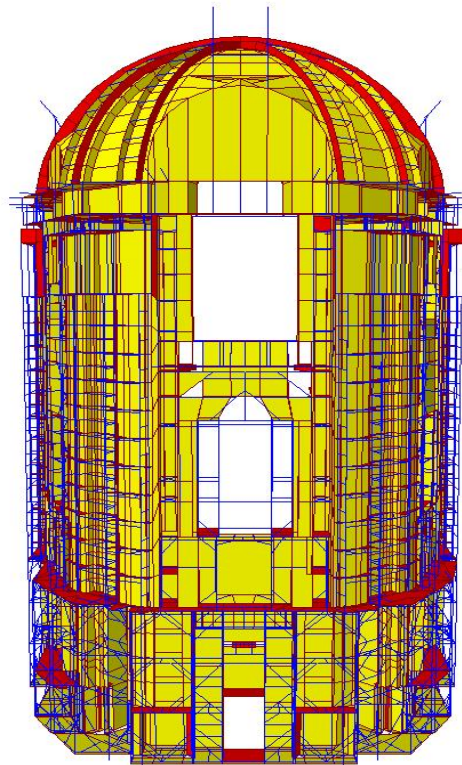


Figura 52. Vista posterior del modelo analítico

4.4.1 Predela

Contiene 2173 elementos barra para representar las columnas, travesaños y diagonales que integran y dan forma a los once módulos de esta sección. 1635 elementos placa para incluir la participación de los pisos de madera, ménsulas, repisas, tablonés de división, así como también los entablamentos colocados en los módulos para obtener una superficie lisa en la parte frontal del retablo. Todos estos elementos están conectados a través de 2584 nodos (*Figura 53*). Esta misma técnica de modelado se repite en el cuerpo y en la concha, aunque con sus respectivas particularidades.

En esta parte del modelo las columnas que se encuentran juntas, y que en planta forman una sección “L”, fueron idealizadas como una sección ángulo con propiedades geométricas similares a las de la estructura real dado que las columnas están unidas en toda su longitud por un adhesivo eficiente conocido como “agua-cola”.

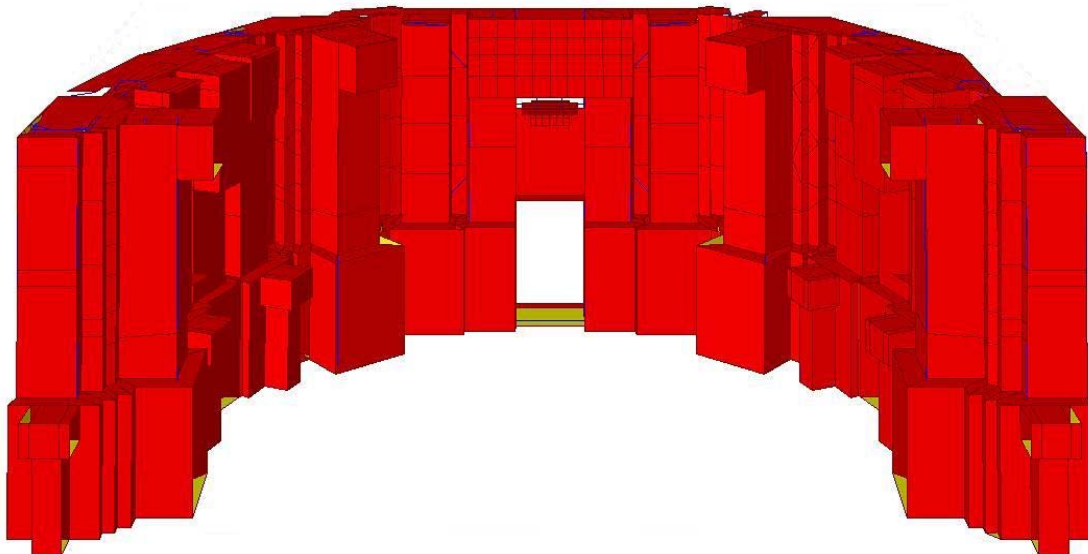


Figura 53. Vista frontal del modelo analítico de la predela

4.4.2 Cuerpo

Las columnas del cuerpo se idealizaron de la misma manera en que se hizo para las columnas de la predela. El cuerpo se discretizó mediante 4525 elementos barra y 5095 elementos placa, los cuales se unen entre ellos mediante 6234 nodos (*Figura 54*).

El cuerpo resultó ser la parte más difícil de modelar, debido al gran número de módulos que lo integran y a su compleja geometría; realizar la conexión entre ellos resultó ser un arduo trabajo. Se consideró utilizar formas geométricas más sencillas para ciertos módulos, como es el ejemplo de las columnas estípites en las que se emplearon formas geométricas regulares pero con propiedades geométricas similares a las del prototipo.

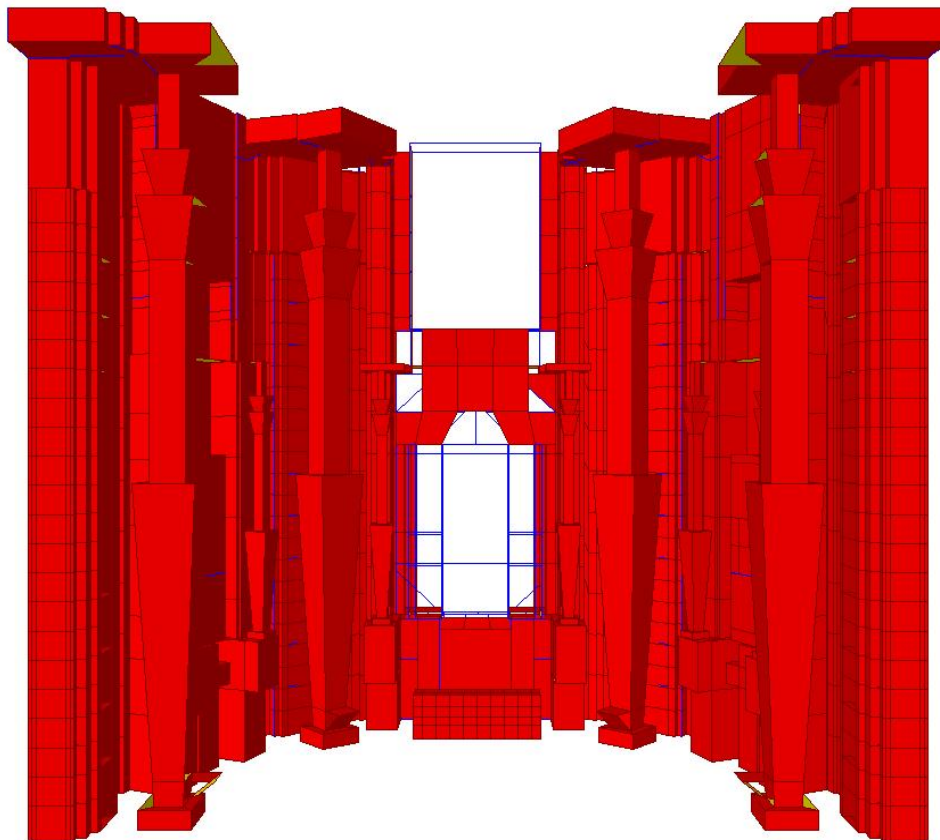


Figura 54. Vista frontal del modelo analítico del cuerpo

4.4.3 Concha

En total se emplearon 381 elementos barra, 1658 elementos placa y 1556 nodos para representar la geometría de esta sección (*Figura 55*). Esta parte del modelo no incluye los tensores metálicos rígidos colocados en el año de 1940, ni los tensores de la última intervención en el 2004. Se analizó el modelo como si nunca se hubiera deformado y sin que se reforzara.

Tomando en cuenta la superficie curva de la concha fue necesario emplear elementos placas de diferentes dimensiones para reproducir en lo posible la geometría de esta parte del retablo.

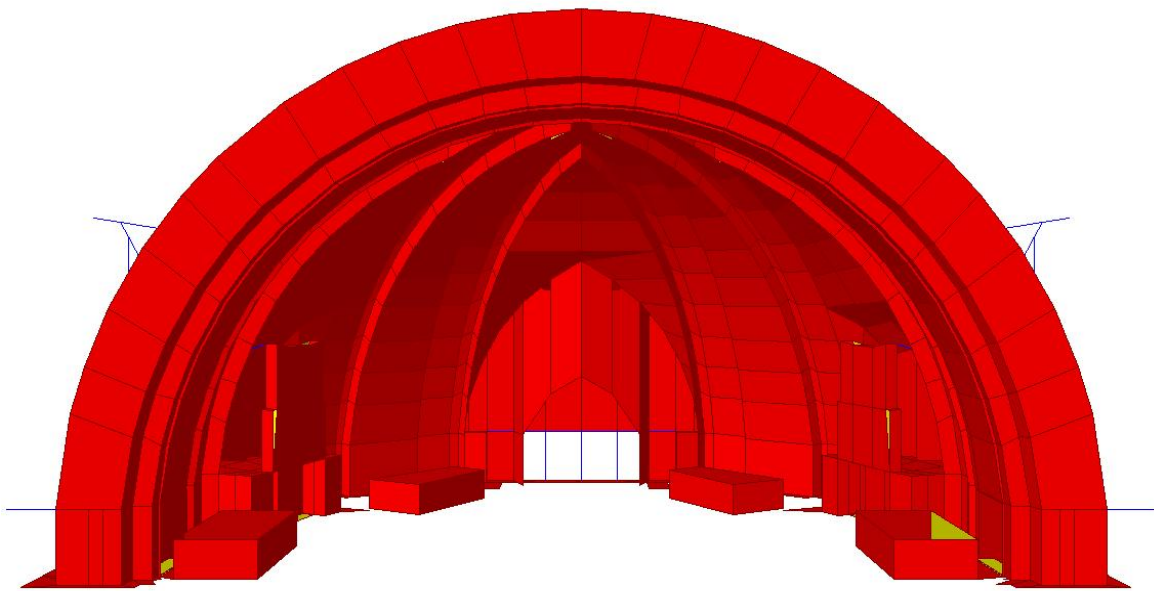


Figura 55. Vista frontal del modelo analítico de la concha

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez concluido el modelo analítico del retablo se realizaron los análisis ante la acción del peso propio y ante sismo. Los resultados obtenidos así como la interpretación de los mismos se presentan a continuación.

5.1 Análisis ante cargas gravitacionales

5.1.1 Aspectos generales

Primero se consideró el retablo apoyado sobre una base horizontal, firme y sin ninguna distorsión, para ello se restringieron los desplazamientos de los nodos ubicados en la base del modelo. Con este análisis se determinó el peso propio de cada uno de los cuerpos que integran la estructura, así como el peso total de la misma. Además, se obtuvieron los desplazamientos que experimenta la estructura ante este efecto y los esfuerzos a los que se ven sometidos los elementos que la integran.

En la *Figura 56* aparecen los pesos de cada uno de los cuerpos del retablo; como puede apreciarse, el retablo tiene un peso aproximado de 41 t.

Considerando que su peso se transmite en un área de 36.4 m², la presión de contacto en el piso del presbiterio resulta de 1.13 t/m².

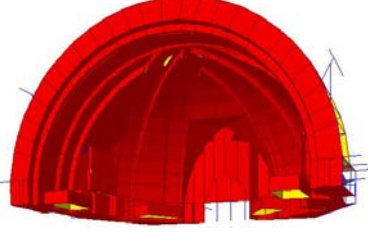
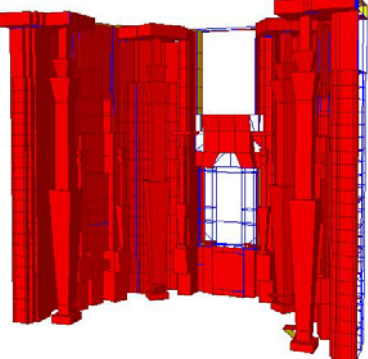
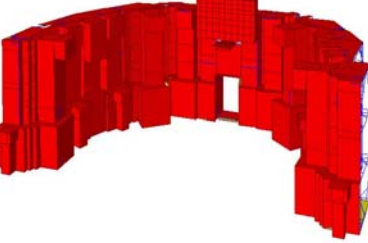
	Peso por cada cuerpo	Peso acumulado
	W = 9552 [kg]	W = 9552 [kg]
	W = 19826 [kg]	W = 29378 [kg]
	W = 8575 [kg]	W = 37954 [kg]
Ornamentación y esculturas	W = 3033 [kg]	W = 40987 [kg]
	$\Sigma = 40987$ [kg]	

Figura 56. Distribución parcial y acumulada de los pesos del modelo

5.1.2 Desplazamientos

En la *Figura 57* aparece la configuración deformada del modelo; en ella se aprecia que ante la acción del peso propio la estructura trata de abrirse, el costado poniente de la concha se desplaza casi 3 mm hacia afuera y el costado oriente también se desplaza cerca de 5 mm hacia afuera; es decir, en los extremos laterales del retablo, a la altura de las cornisas del ábside, la estructura de madera se abre cerca de 8 mm.

Al trazar los desplazamientos que experimentan los bordes del retablo en cada dirección se obtiene las gráficas que aparecen en la *Figura 58*.

En la dirección este-oeste, la configuración deformada aparece en el inciso a) de la misma figura, en la que se aprecia que tanto la predela como el cuerpo se inclinan hacia afuera, mientras que el arco principal gira hacia el interior de la nave del templo; el desplazamiento mayor se produce hacia el este, alcanza una magnitud de 5 mm y es aproximadamente 40 % mayor que el obtenido hacia el oeste; en ambos casos los desplazamientos máximos se producen a una altura de 16.7 m.

En la dirección norte-sur, la configuración deformada que aparece en el inciso b) de la *Figura 58*, indica que tanto el cuerpo como la predela se inclinan ligeramente hacia el norte, ya que el desplazamiento máximo no excede de 1 mm en una altura de 16.7 m, mientras que la clave del el arco principal, al girar la concha hacia el sur, se desplaza casi 6 mm en una altura aproximada de 8 m; es decir, experimenta un giro doce veces mayor que la estructura ubicada debajo de la concha.

En la dirección vertical, de acuerdo con el inciso c) de la misma figura, entre la predela y el cuerpo se acentúa el desplazamiento debido principalmente a la diferencia de estructuración entre ellos; el desplazamiento en la zona de unión no

excede de 1 mm. Los desplazamientos mayores se producen en la concha en donde su clave desciende 6 mm, de los cuales cuatro se generan a partir de su arranque.

De lo anterior se deriva que la predela y el cuerpo son menos deformables que la concha y que los desplazamientos máximos se concentran en esta última parte, la cual esencialmente gira hacia el sur tratando de desprenderse de la estructura de soporte.

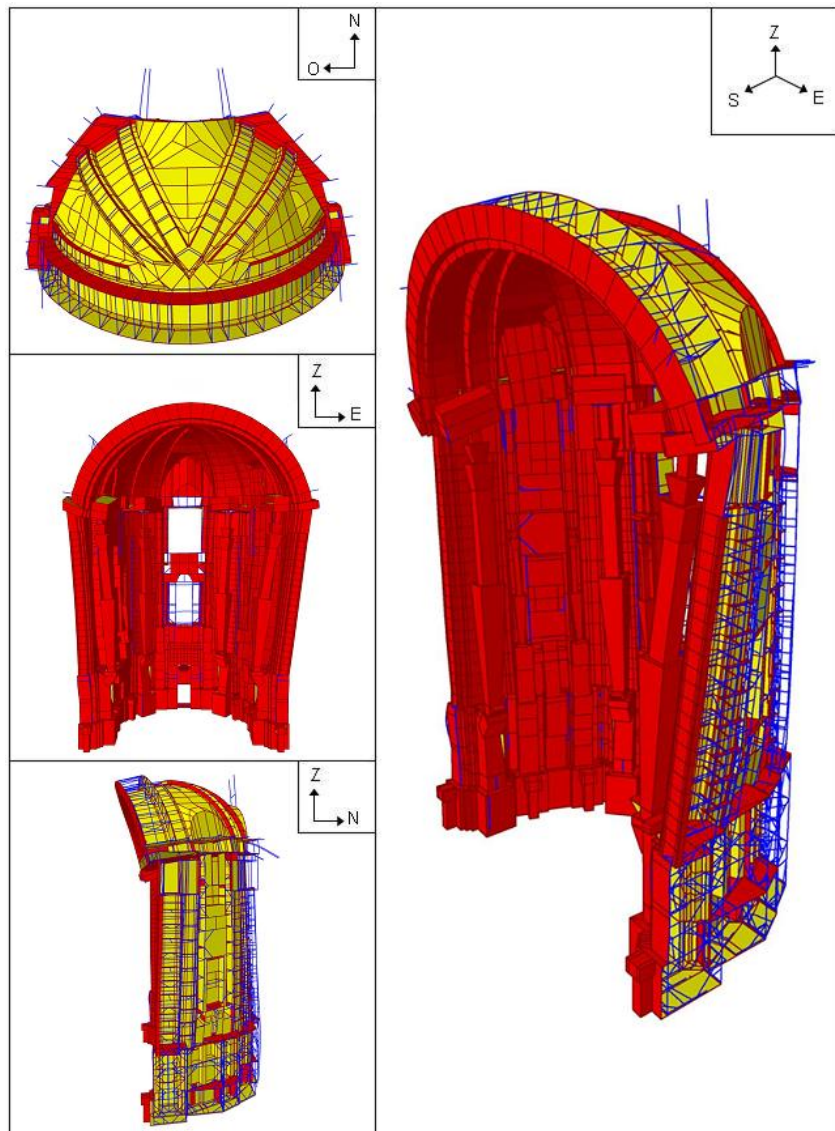
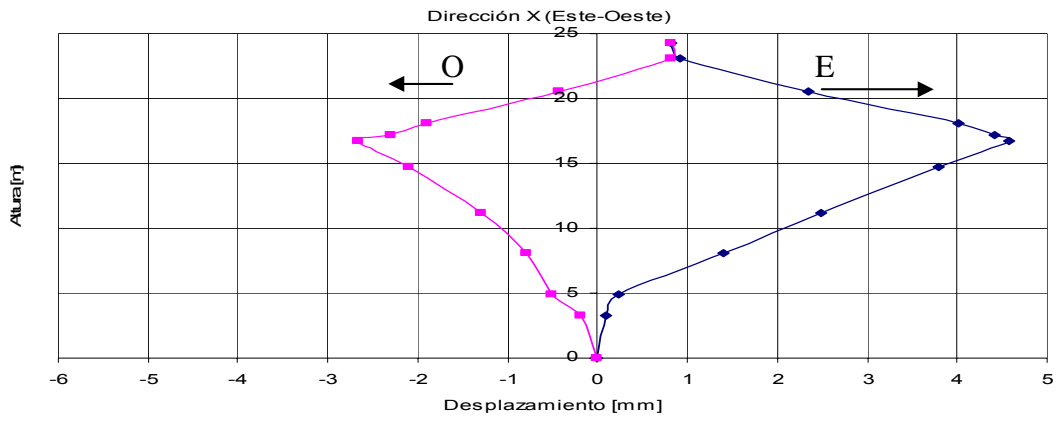
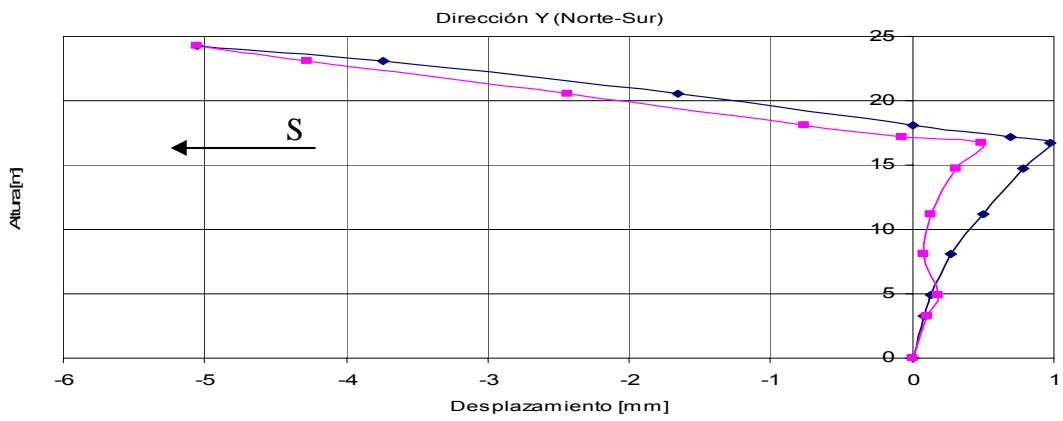


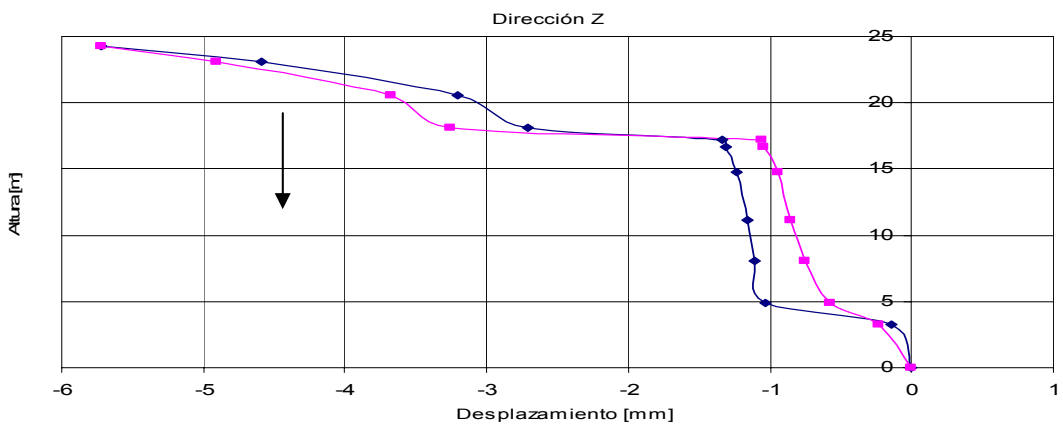
Figura 57. Geometría deformada del modelo por la acción del peso propio



a)



b)



c)

Figura 58. Desplazamientos del modelo en las tres direcciones debido a la acción del peso propio

5.1.3 Esfuerzos

En las *Figuras 59 y 60*, se presenta la distribución de esfuerzos axiales que actúan en la estructura debido a la acción del peso propio.

De acuerdo con los resultados del análisis, en la mayor parte de la estructura los esfuerzos están muy por debajo de la capacidad de la madera. Sin embargo, existen ciertos elementos en los que no ocurre esto, la mayoría de esos casos está asociada con una concentración de esfuerzos provocada por el acoplamiento entre elementos barra y elementos placa, situación que difiere de las condiciones reales debido a que el modelo no representa los detalles constructivos de las conexiones, las cuales están realizadas de tal manera que logran una unión eficiente entre dichos elementos, evitando así que se produzcan las concentraciones de esfuerzos mencionadas.

Atención especial habrá que prestar a un conjunto de aproximadamente diez elementos barra en donde los esfuerzos resultaron elevados, sobre todo porque algunas de estas piezas están fracturadas y otras se encuentran deterioradas.

Respecto a los elementos placa, en términos generales puede decirse que los esfuerzos en la dirección S_{11} , en casi la totalidad de la estructura, están por debajo de los 5 kg/cm^2 en compresión, en tensión los esfuerzos son también del mismo orden. Sin embargo, existen casos en donde los esfuerzos a tensión pueden alcanzar los 50 kg/cm^2 , los cuales se presentan principalmente en la zona del sotabanco debido a la excentricidad con la que son transmitidas las cargas de los niveles superiores de la estructura y a la concentración de cargas que generan las columnas estípites sobre el sotabanco.

En la dirección S_{22} los esfuerzos de compresión y tensión son de poca magnitud y tampoco exceden los 5 kg/cm^2 ; los esfuerzos más altos aparecen a la altura del sotabanco por la excentricidad que tiene la estructura. Dichos esfuerzos van

decreciendo hacia la concha en donde se vuelven a incrementar, especialmente en el cuerpo por debajo de la cornisa y en la zona del arco principal de la concha.

Llama la atención la distribución de esfuerzos en la concha y especialmente en el arco principal, en donde se producen esfuerzos a tensión por el intradós y esfuerzos a compresión en el extradós, porque los resultados son consistentes con el comportamiento estructural de este tipo de elementos. En todos los casos las magnitudes de los esfuerzos no rebasan los 5 kg/cm^2 , por lo que se encuentran muy por debajo de la capacidad estructural de la madera con la que fue construido el retablo.

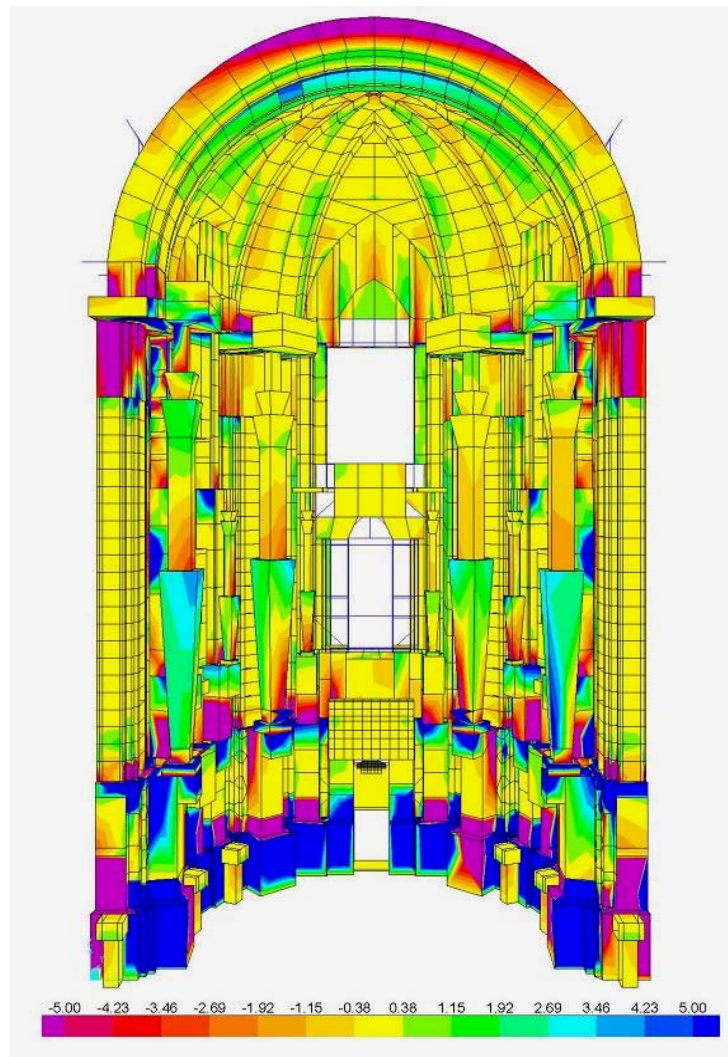


Figura 59. Distribución de esfuerzos axiales (S_{11}) debido a la acción del peso propio, en kg/cm^2

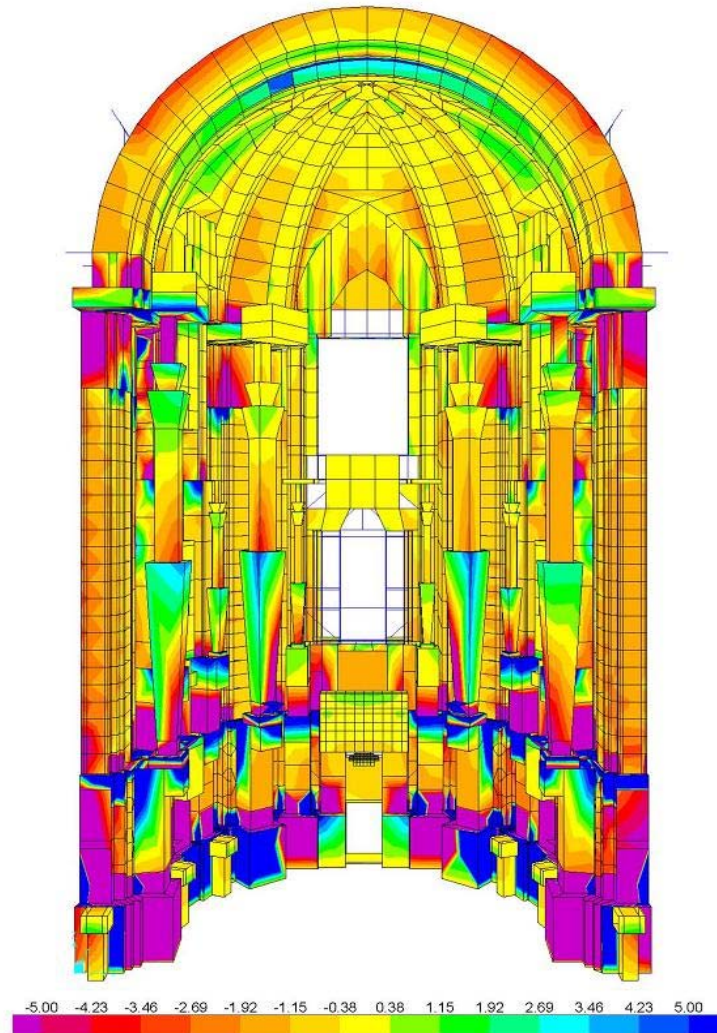


Figura 60. Distribución de esfuerzos axiales (S_{22}) debido a la acción del peso propio, en kg/cm^2

5.2 Análisis sísmico

5.2.1 Aspectos generales

Para estudiar el comportamiento del retablo ante sismo, se realizó el análisis modal de su estructura tomando como base el espectro de diseño que especifica el Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Al modelo se le incrementó la masa al doble para tomar en cuenta tanto la contribución en masa de los elementos ornamentales, como para revisar la seguridad de los anclajes.

El modelo se analizó bajo dos condiciones de apoyo identificadas como A y B: la primera, consiste en restringir el desplazamiento de todos los nodos ubicados en la base del modelo; en la condición B, además se restringieron cuatro nodos del arco principal, dos del nicho norte y todos los nodos que se encuentran en el desplante de la concha. Bajo estas condiciones se realizó el análisis de la estructura.

Como parte de este análisis se obtuvieron los periodos y modos de vibración fundamentales del modelo con las condiciones de apoyo mencionadas, para comparar las diferencias entre cada uno de ellos; como puede apreciarse en la tabla 14, el modelo correspondiente a la condición de apoyo A tiene un primer modo de vibrar con periodo de 0.85 segundos, mientras que para la condición de apoyo B el periodo fundamental es de 0.23 segundos.

Tabla 14 Modos y periodos de vibración fundamentales

Modo	Condición de apoyo A Periodo [s]	Condición de apoyo B Periodo [s]
1	0.852	0.231
2	0.365	0.230
3	0.292	0.226
4	0.235	0.225
5	0.231	0.220
6	0.229	0.220
7	0.223	0.211
8	0.220	0.211

Para la condición de apoyo A, el primer modo de vibrar corresponde a la flexión de la estructura en la dirección oriente-poniente (*Figura 61*); en el segundo modo el modelo se flexiona principalmente en la dirección norte-sur (*Figura 62*); mientras que en el tercer modo el modelo trata de abrirse a la altura de desplante de la concha (*Figura 63*); y a partir del cuarto modo (*Figura 64*), se producen

movimientos locales de las distintas partes de la estructura, en especial de las columnas estípite.

En la condición de apoyo B los modos naturales de vibrar de la estructura tienen un periodo corto y están asociados principalmente con la vibración de las columnas estípite; dos casos típicos correspondientes a los modos 1 y 2 se presentan en las *Figuras 65 y 66*.

Cabe destacar que el modo cuatro de vibrar correspondiente a la condición de apoyo A tiene un periodo similar al del primer modo de la condición B; es decir, las columnas estípite tienen un periodo de vibrar del orden de 0.23 segundos independientemente de las condiciones de apoyo del retablo.



Figura 61. Modo 1 condición de apoyo A

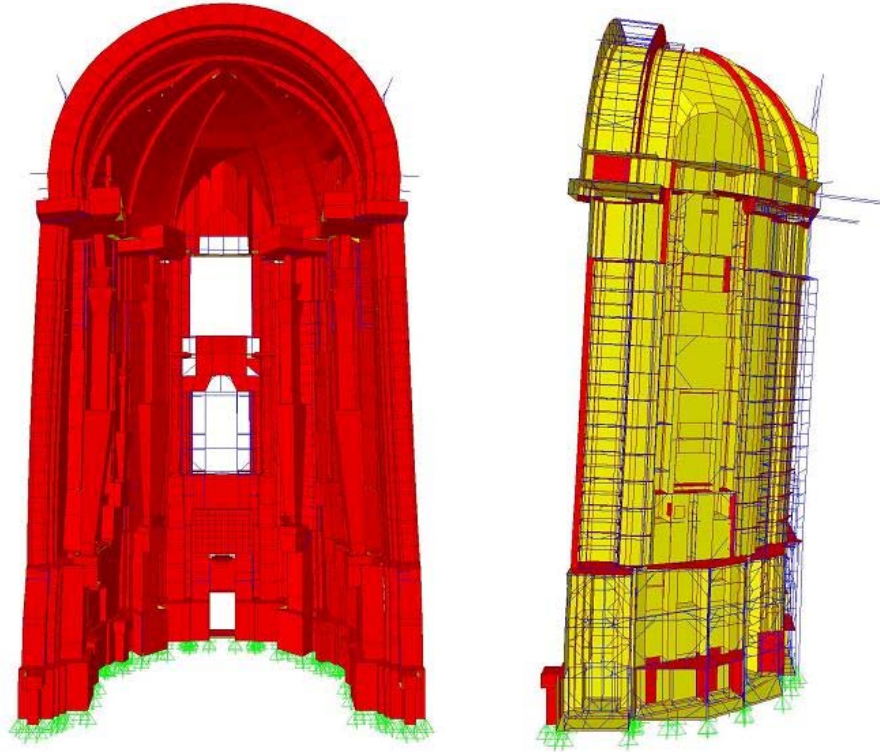


Figura 62. Modo 2 condición de apoyo A



Figura 63. Modo 3 condición de apoyo A



Figura 64. Modo 4 condición de apoyo A



Figura 65. Modo 1 condición de apoyo B

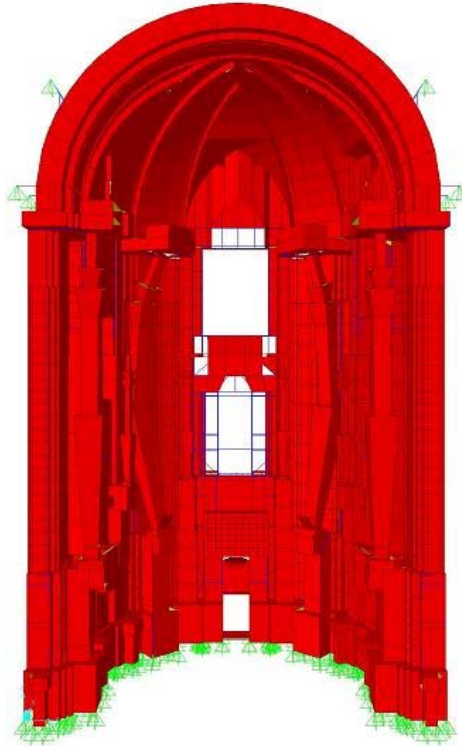


Figura 66. Modo 2 condición de apoyo B

El efecto del sismo se tomó en cuenta en dos direcciones ortogonales, en donde la dirección X va de poniente a oriente y la dirección Y va de sur a norte. De esta manera, y ante las condiciones de apoyo A y B, se realizaron los análisis siguientes:

- Caso 1, condición de apoyo A con sismo dirección X
- Caso 2, condición de apoyo A con sismo dirección Y
- Caso 3, condición de apoyo B con sismo dirección X
- Caso 4, condición de apoyo B con sismo dirección Y

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal en su edición 2004, para diseño por sismo de una estructura la Ciudad de México se divide en las zonas, I, II y III, ésta última a su vez se encuentra dividida en las subzonas III_a, III_b, III_c y III_d; la catedral se ubica en la subzona III_b, que resulta ser la más desfavorable desde el punto de

vista sísmico. El espectro de diseño que establece el reglamento de construcción para esta zona se muestra en la *Figura 67*.

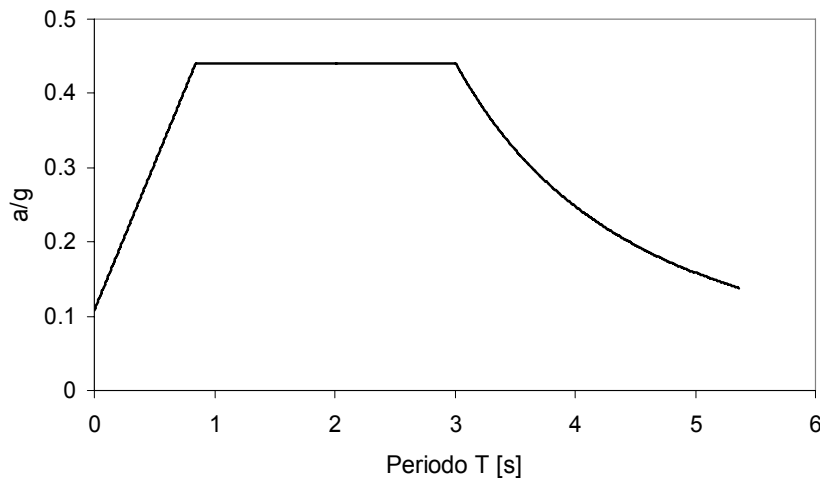


Figura 67. Espectro de diseño sísmico para la subzona III_b de las NTCS-2004

5.2.2 Desplazamientos

Caso 1

En la *Figura 68* aparece la configuración deformada del modelo al aplicar el espectro de diseño en la dirección X, se aprecia que: el desplazamiento mayor se produce en el cuerpo, la predela prácticamente no se distorsiona y la concha se mueve como cuerpo rígido.

Al trazar los desplazamientos que experimentan los bordes del retablo en cada dirección se obtienen las gráficas que aparecen en la *Figura 69*.

En la dirección X la configuración deformada se presenta en el inciso a) de la misma figura; en ella puede apreciarse que en el cuerpo del retablo se produce un desplazamiento de 110 mm en una distancia aproximada de 14 m, lo cual da como resultado una distorsión angular de casi 0.008. Esta distorsión puede considerarse moderada sabiendo que el modelo se encuentra apoyado exclusivamente en su base; es decir sin ningún elemento que lo una a la estructura del ábside.

En la dirección Y la estructura se flexiona, como puede apreciarse en el inciso b) de la *Figura 69*, la predela y la clave de la concha se desplazan de manera incipiente hacia el norte, mientras que el remate del cuerpo y el desplante de la concha se desplazan 60 mm.

En la dirección Z los desplazamientos son poco significativos, ya que como puede constatarse en la el inciso c) de la misma figura el desplazamiento no rebasa los 10 mm.

Caso 2

La configuración deformada que se obtiene aplicando el espectro en la dirección Y se muestra en la *Figura 70*. Como se aprecia en la *Figura 71* los desplazamientos que experimenta la estructura en las tres direcciones son poco significativos, ya que no rebasan los 2 mm.

Casos 3 y 4

En ambos casos los desplazamientos máximos se concentran en las columnas estípites, en donde no rebasan los 3 mm. En el resto de la estructura los desplazamientos resultaron despreciables ya que no excedieron de una centésima de milímetro, motivo por el cual se omite la descripción de la configuración deformada obtenida en estos análisis, misma que se presenta en las *Figuras 72, 73, 74 y 75*.

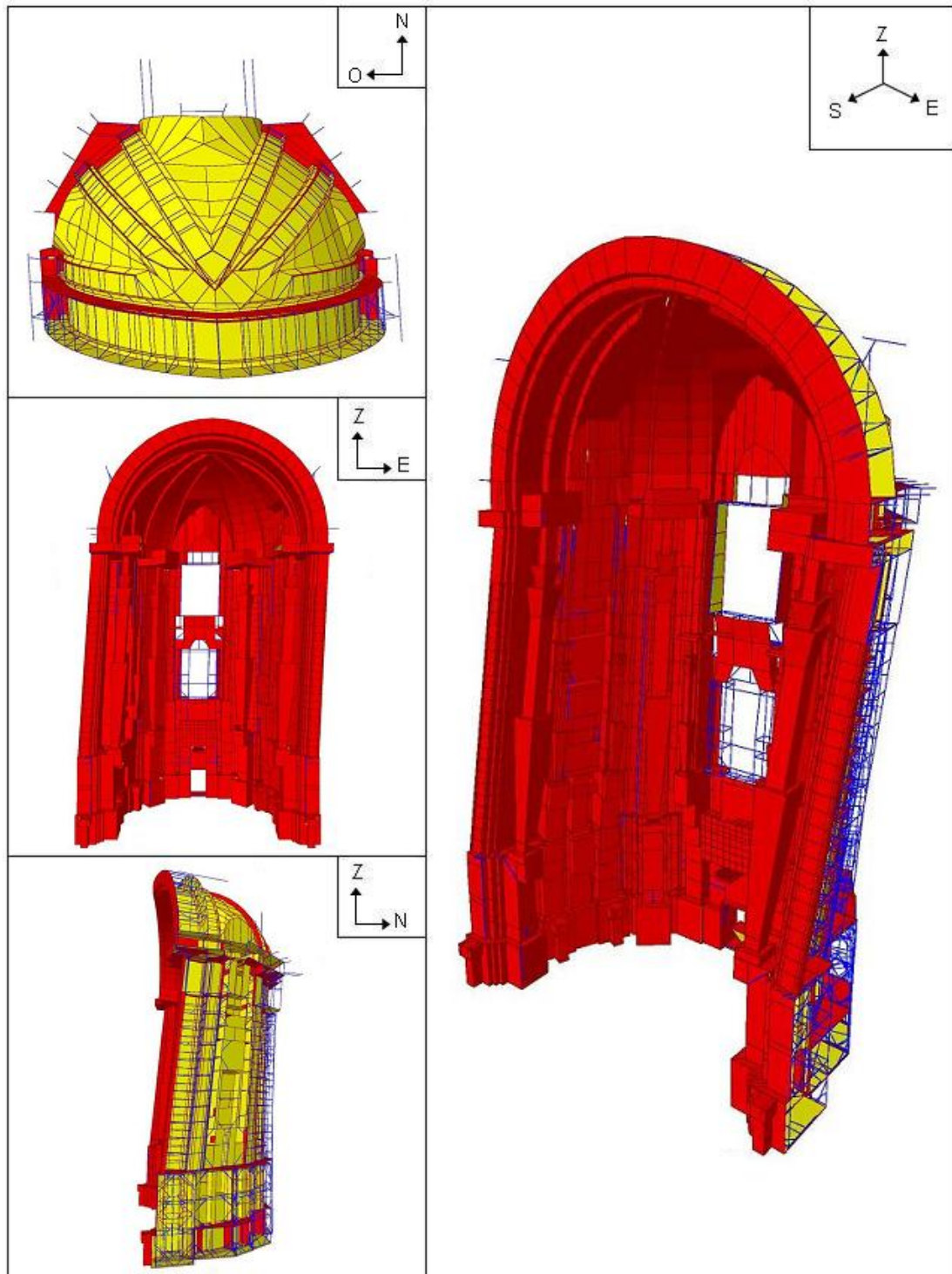
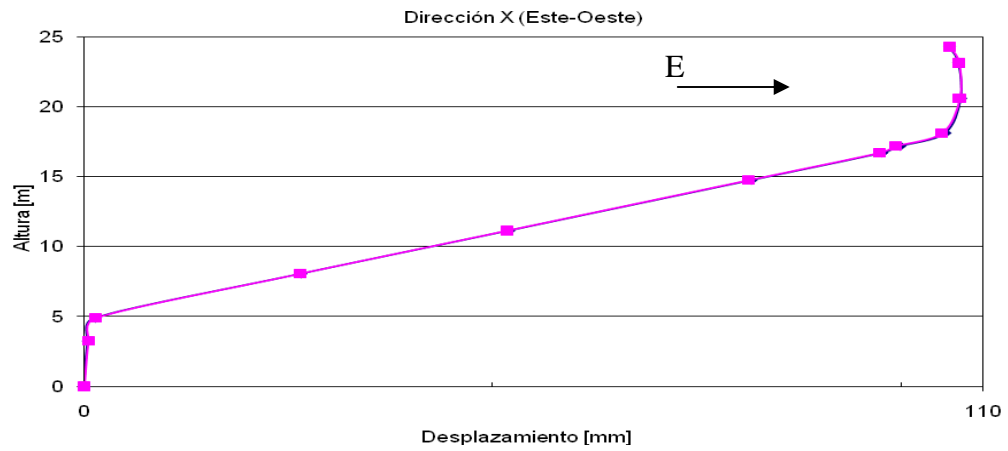
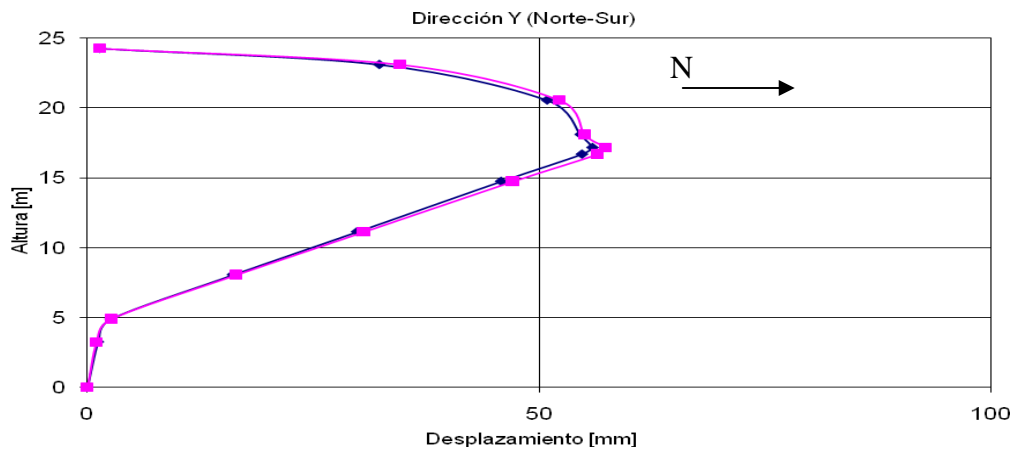


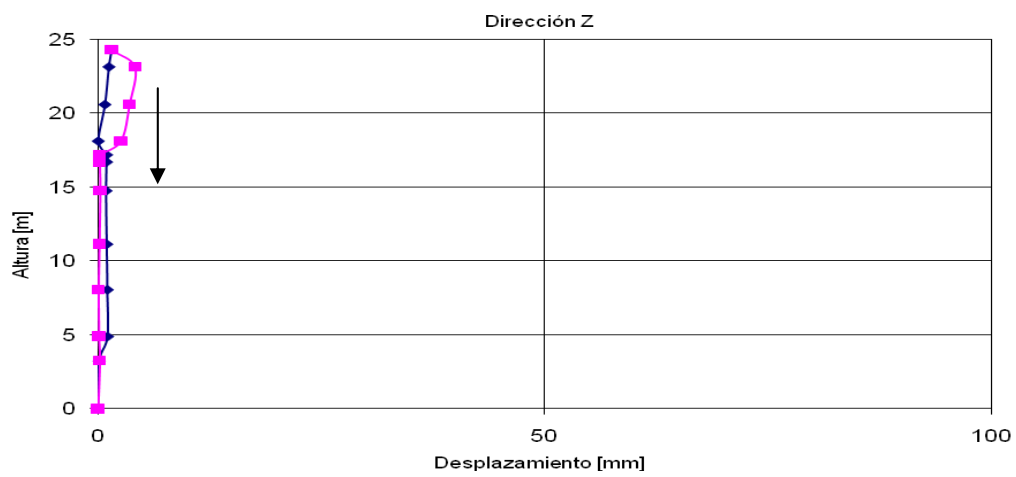
Figura 68. Caso 1, geometría deformada del modelo



a)



b)



c)

Figura 69. Caso 1, desplazamientos del modelo en las tres direcciones

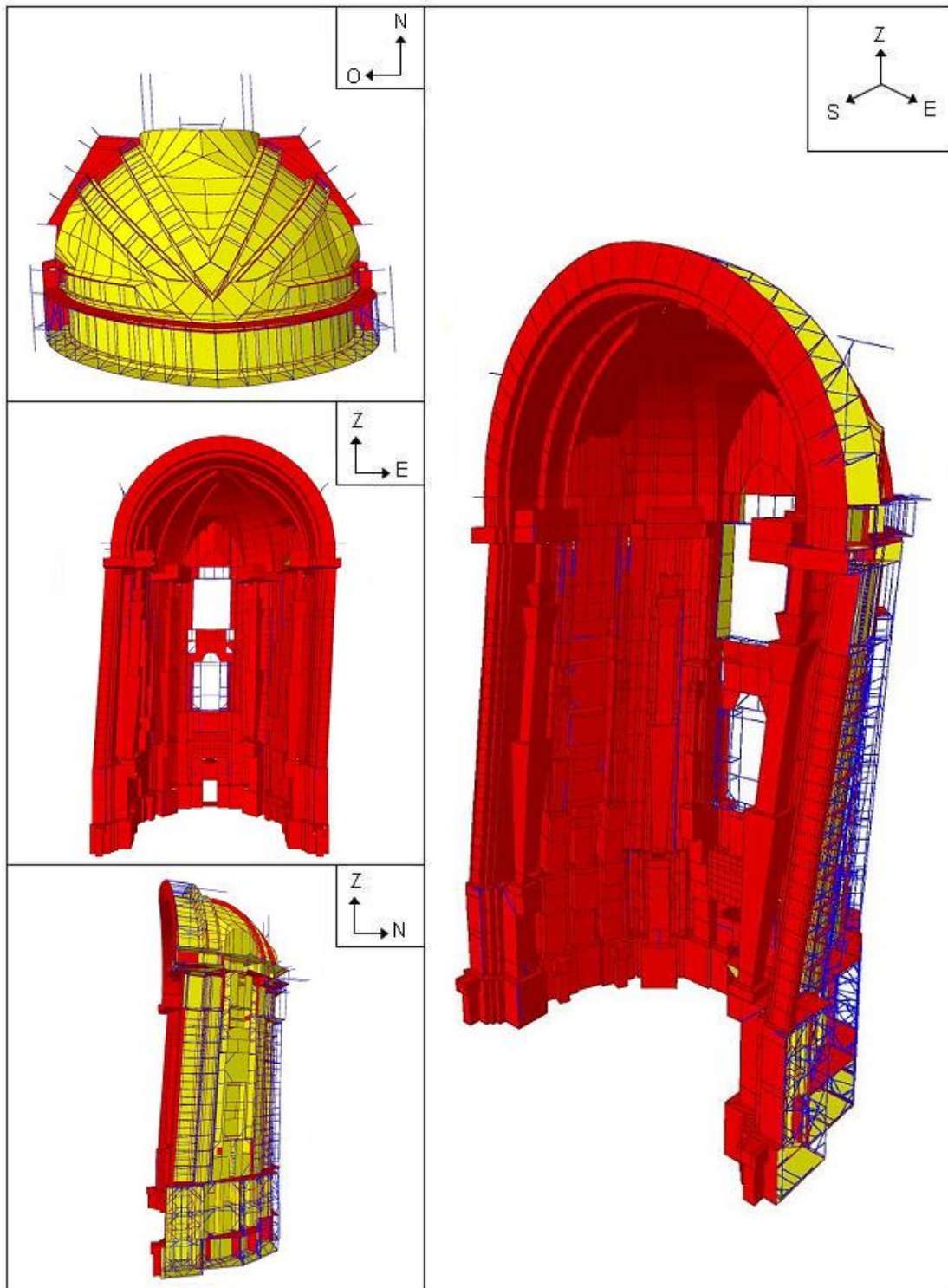
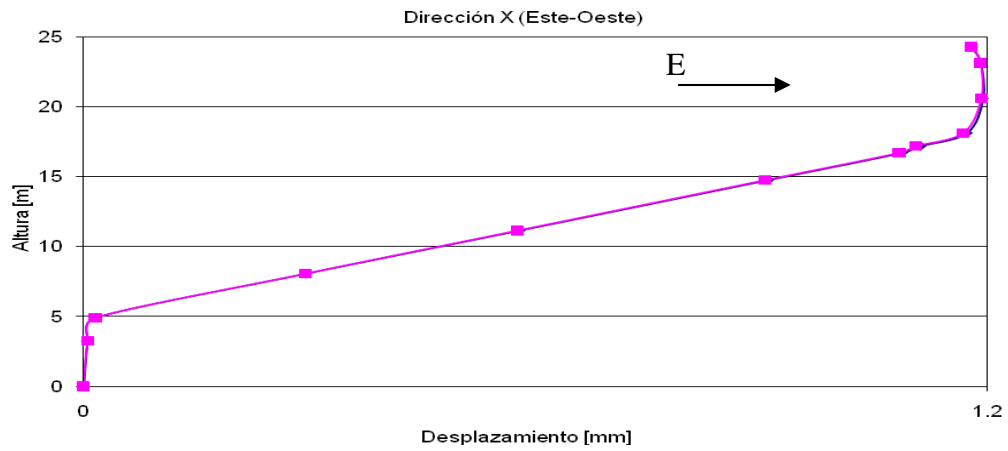
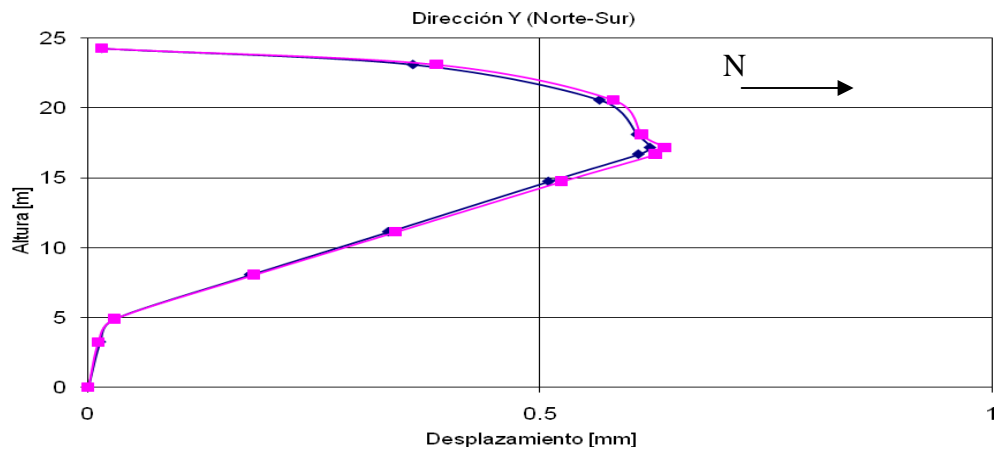


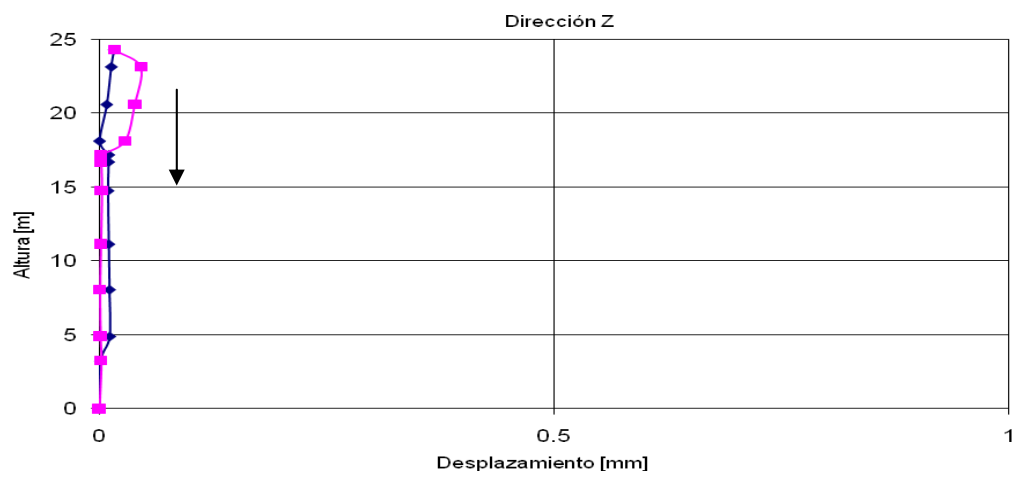
Figura 70. Caso 2, geometría deformada del modelo



a)



b)



c)

Figura 71. Caso 2, desplazamientos del modelo en las tres direcciones

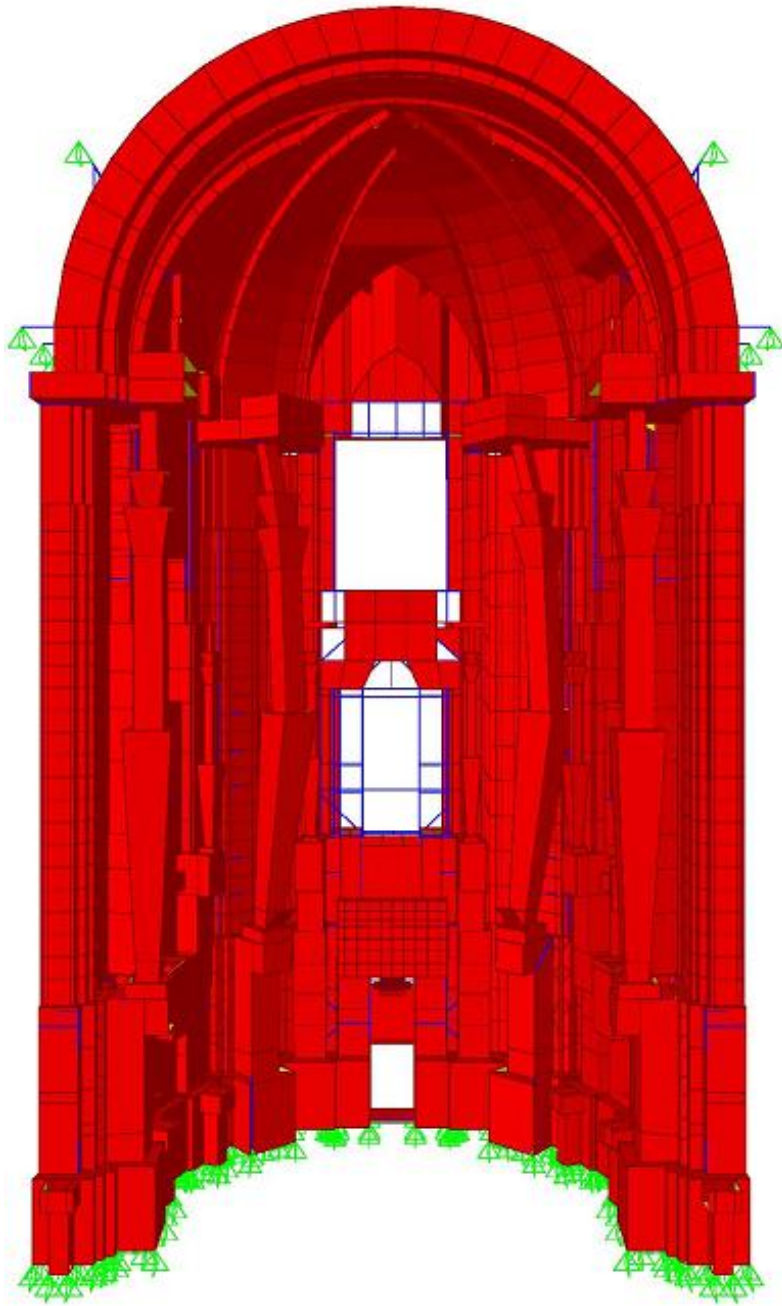
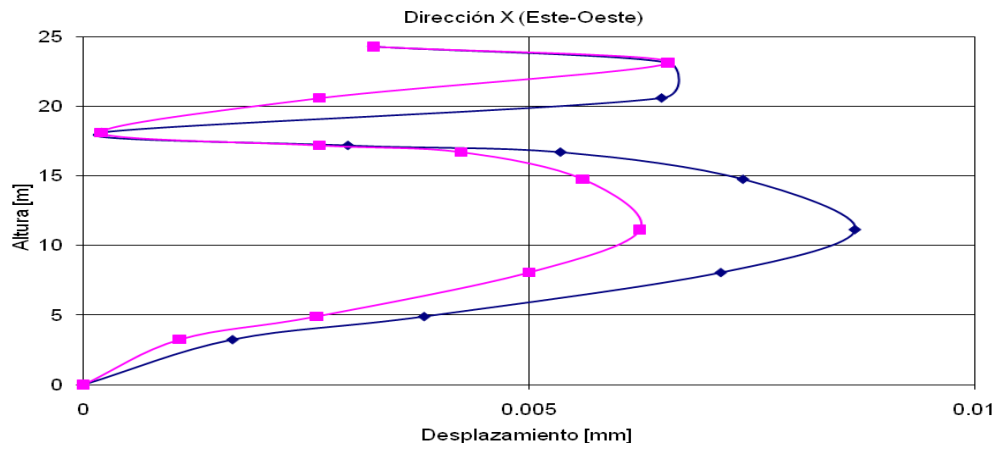
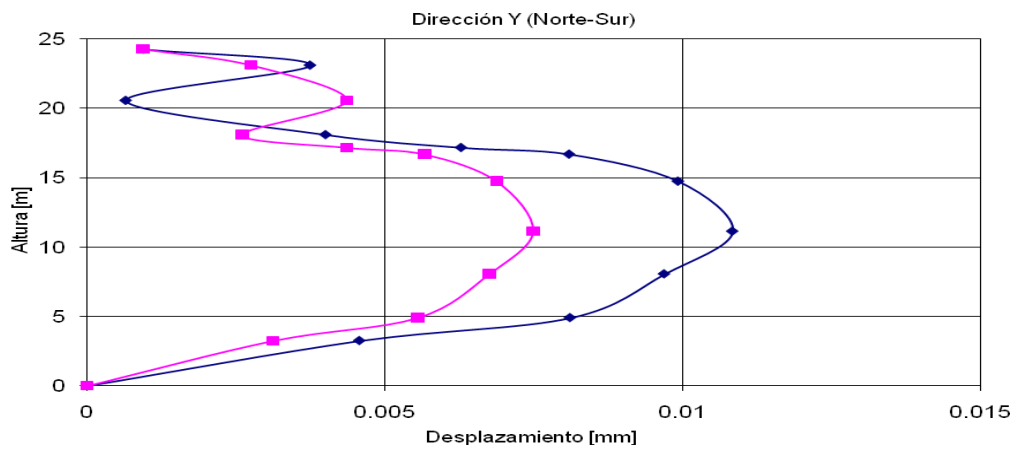


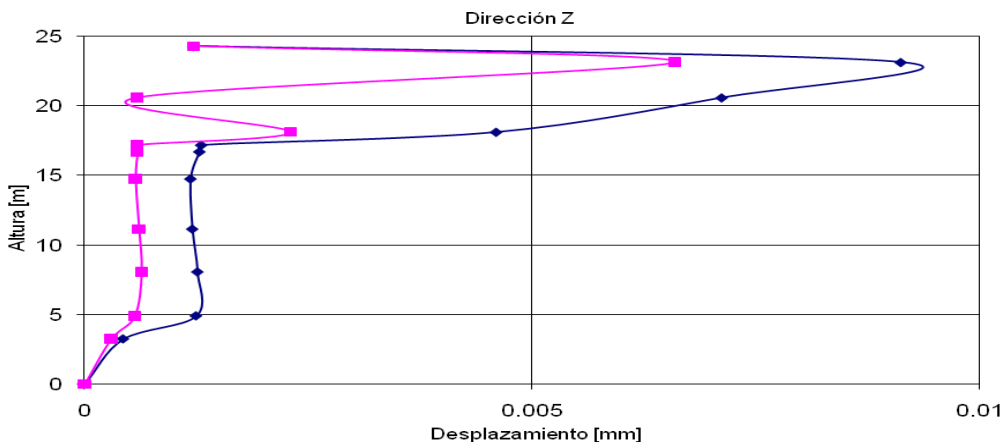
Figura 72. Caso 3, geometría deformada del modelo



a)



b)



c)

Figura 73. Caso 3, desplazamientos del modelo en las tres direcciones

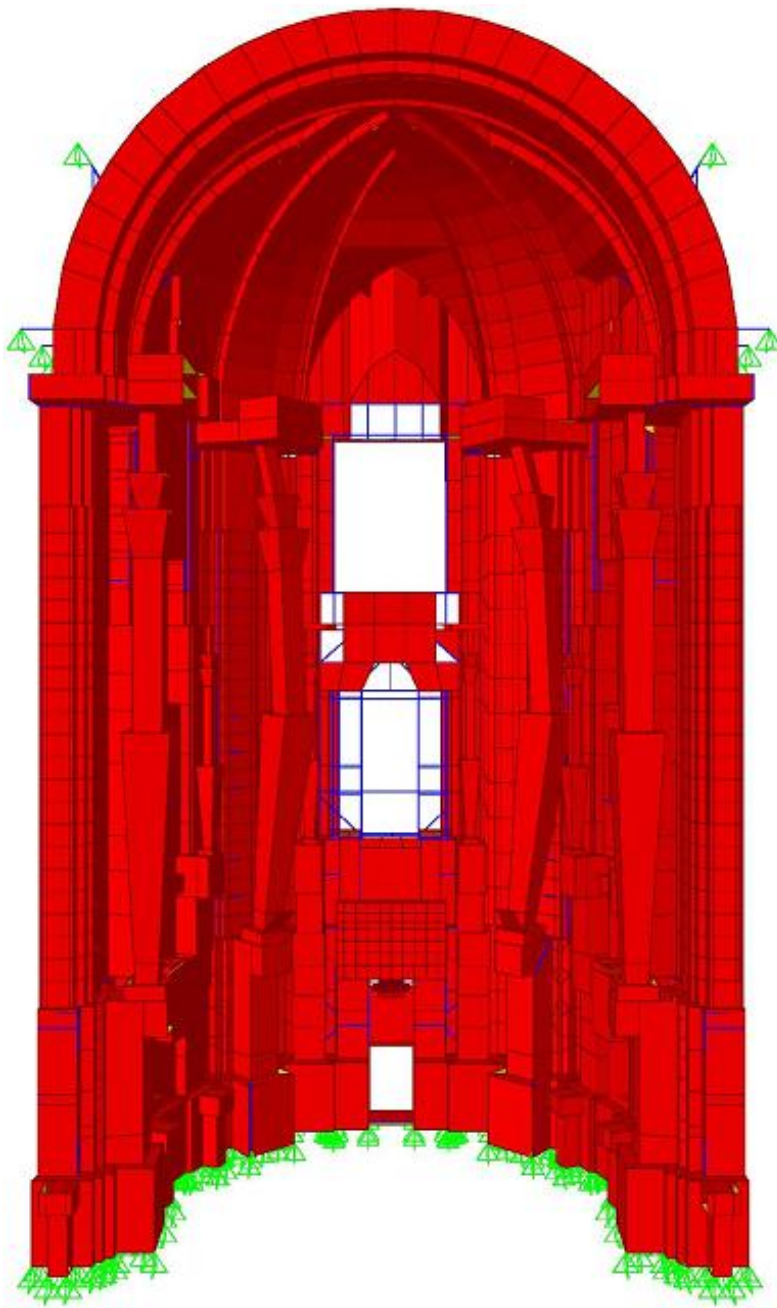
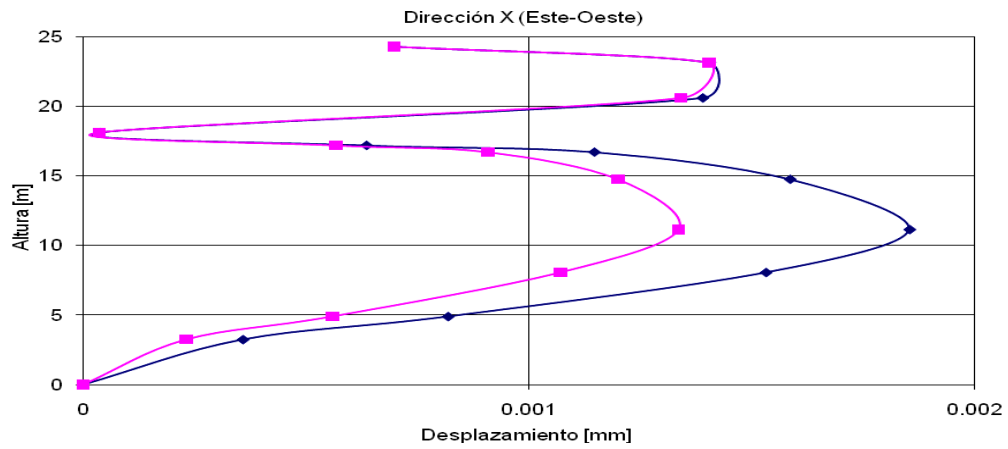
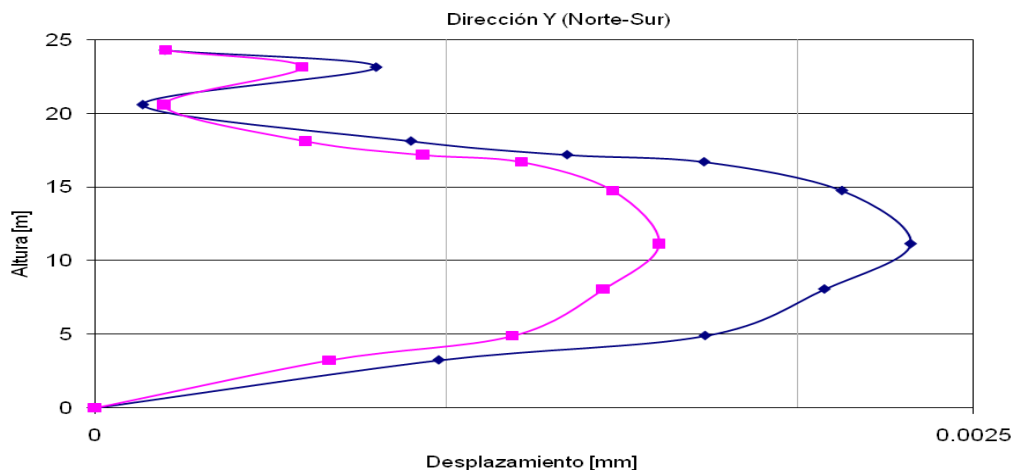


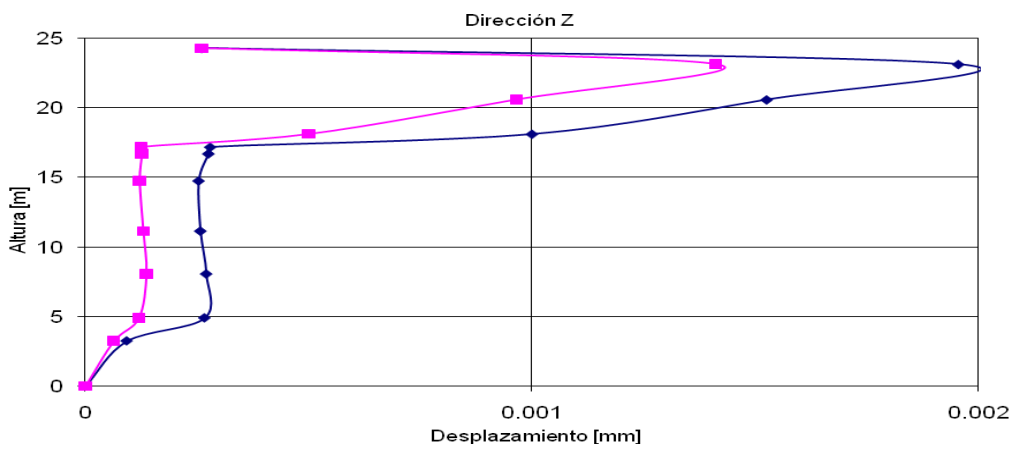
Figura 74. Caso 4, geometría deformada del modelo



a)



b)



c)

Figura 75. Caso 4, desplazamientos del modelo en las tres direcciones

5.2.3 Esfuerzos

De acuerdo con este análisis, los cambios de esfuerzos que se producen en la estructura a causa de sismo tienen poca influencia en los elementos que la integran.

En el caso de las barras con esfuerzos elevados, identificadas en el análisis por cargas gravitacionales, el incremento de esfuerzos debido a sismo también es reducido, por lo que para estos elementos la condición más desfavorable resultó ser el peso propio de la estructura.

Caso 1

Respecto a los elementos placa, los esfuerzos obtenidos en el análisis sísmico fueron de poca magnitud en ambas direcciones. En las *Figuras 76 y 77* se aprecia que bajo la acción del espectro en la dirección X los esfuerzos S_{11} y S_{22} en la mayor parte de los elementos están por debajo de los 7 kg/cm^2 . También puede observarse que la zona del sotabanco es la más esforzada; como ya se había señalado, esto se debe a la excentricidad con la que son transmitidas las cargas de los niveles superiores de la estructura.

Caso 2

En las *Figuras 78 y 79* aparecen, respectivamente, los esfuerzos axiales S_{11} y S_{22} al aplicar el sismo en la dirección Y; en estas figuras se ilustran los esfuerzos que ocurren en la parte inferior de la predela, mismos que no rebasan los 3 kg/cm^2 , sin embargo existen casos donde los esfuerzos pueden alcanzar los 20 kg/cm^2 , esta situación se debe a la concentración de cargas que generan las columnas estípites sobre el sotabanco.

Caso 3

Aplicando el espectro en la dirección X, los esfuerzos que actúan en los diversos elementos de la estructura son de poca magnitud y no exceden de 3 kg/cm^2 . En

las Figuras 80 y 81 aparecen los esfuerzos axiales S_{11} y S_{22} , y se aprecia que en la parte del sotabanco y en las columnas estípite existe una concentración de esfuerzos; en algunos elementos de las dos columnas estípite internas se presentan esfuerzos que llegan a los 7 kg/cm^2 .

Caso 4

En las Figuras 82 y 83 se observa que los esfuerzos axiales S_{11} y S_{22} resultan uniformes, con una dispersión baja y no exceden los 3 kg/cm^2 , lo cual se atribuye a los apoyos que se colocaron en la parte superior de modelo, ya que éstos restringen de manera eficiente el desplazamiento de la toda la estructura. Como puede apreciarse, en las columnas estípite internas existe una concentración de esfuerzos que no rebasa los 6 kg/cm^2 .

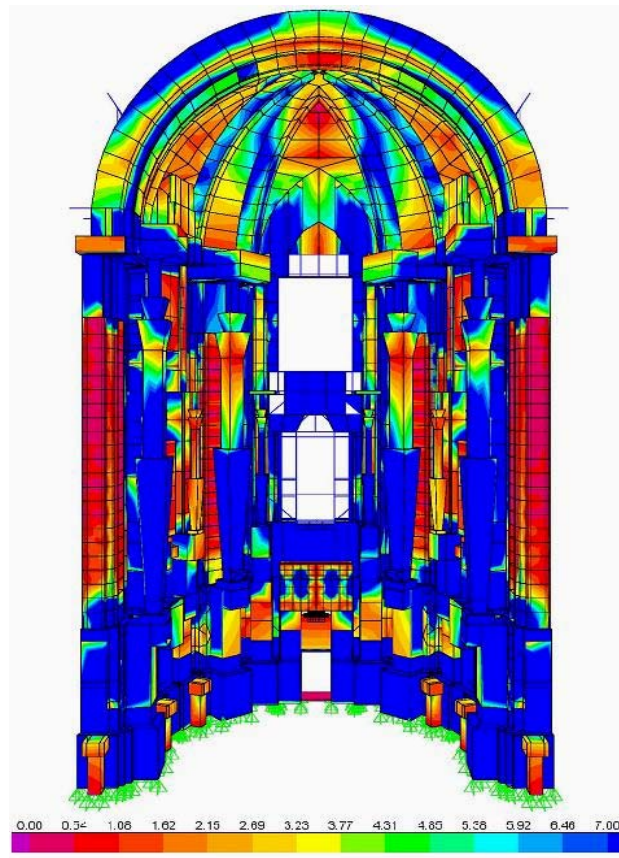


Figura 76. Caso 1, distribución de esfuerzos axiales S_{11}

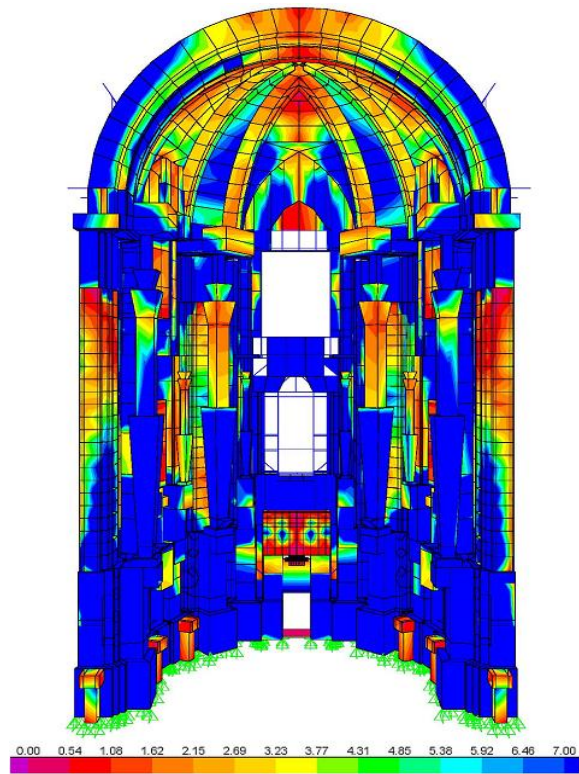


Figura 77. Caso 1, distribución de esfuerzos axiales S_{22}

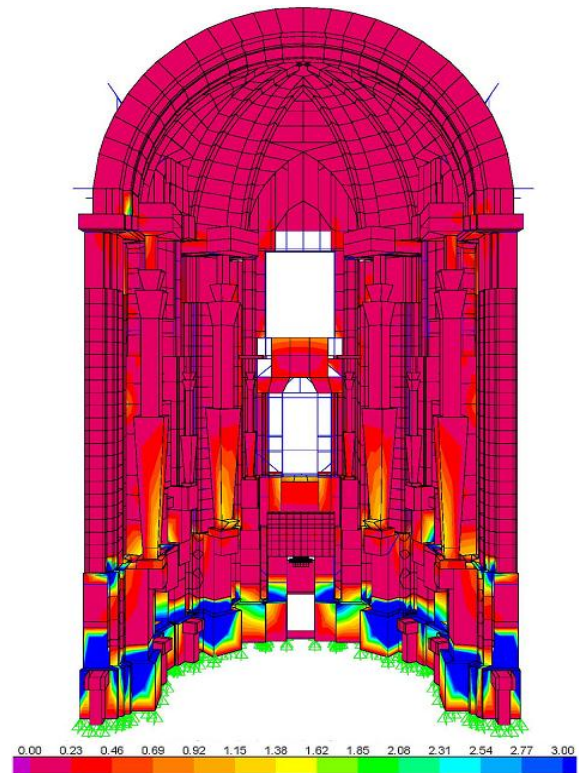


Figura 78. Caso 2, distribución de esfuerzos axiales S_{11}

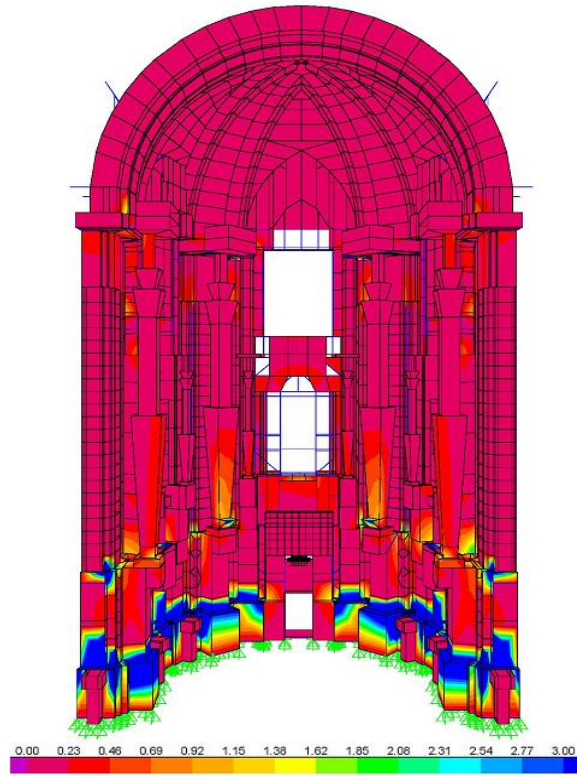


Figura 79. Caso 2, distribución de esfuerzos axiales S_{22}

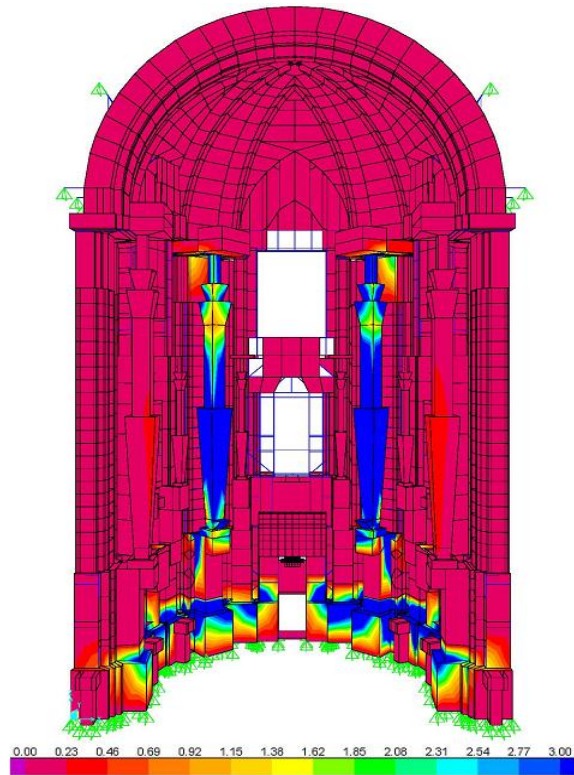


Figura 80. Caso 3, distribución de esfuerzos axiales S_{11}

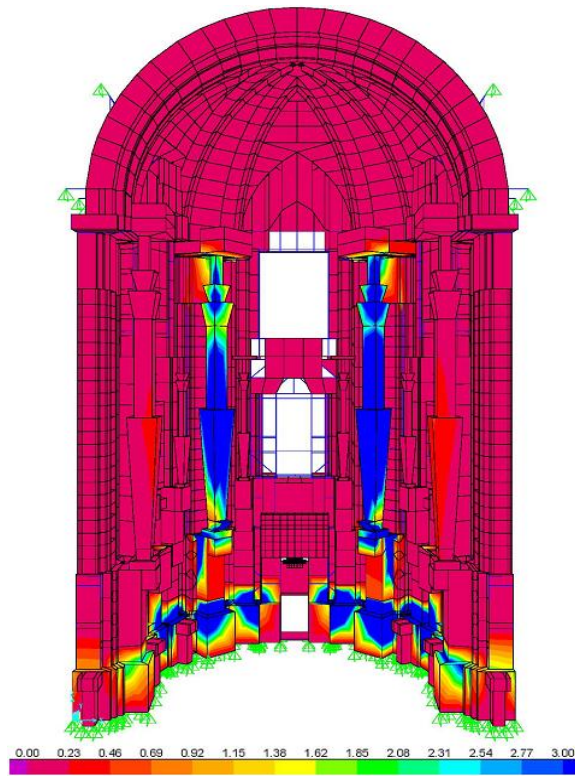


Figura 81. Caso 3, distribución de esfuerzos axiales S_{22}

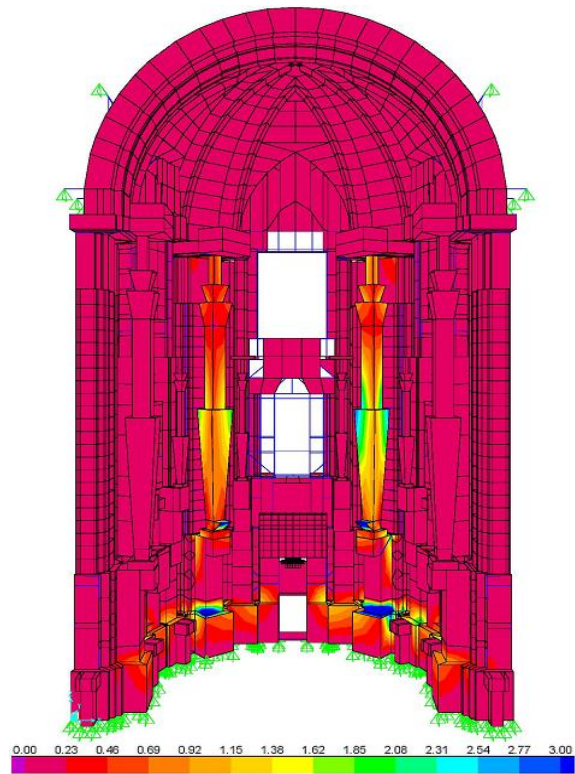


Figura 82. Caso 4, distribución de esfuerzos axiales S_{11}

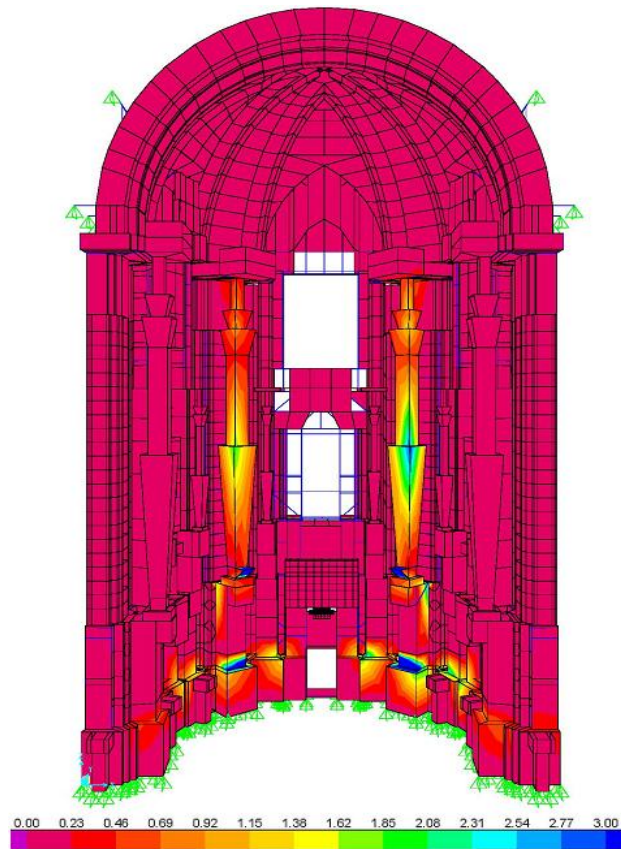


Figura 83. Caso 4, distribución de esfuerzos axiales S_{22}

Debido a que los desplazamientos de la estructura son de poca magnitud y las fuerzas internas en los elementos estructurales son bajas en comparación con su capacidad, puede decirse que el autor de la obra artística tuvo una excelente concepción estructural de la misma, lo que le ha permitido mantenerse en pie a pesar del tiempo y de la intensa actividad sísmica del sitio en el que se encuentra construida.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La construcción del Retablo de los Reyes resultó una obra excepcional y el mejor proyecto de Gerónimo Balbás en la época colonial. Esta obra de magnífica calidad en su diseño y manufactura, se convirtió en una influencia determinante en el arte novohispano al introducir su autor la columna estípite en los retablos de la Nueva España. La perdurabilidad del mueble es desde luego prueba de calidad de su fabricación, de su excelente concepción estructural y de la resistencia de sus materiales.

El salvaguardar su belleza para tiempos futuros es importante, pero lo es también la seguridad de la gente que lo visita, por eso fue necesario estudiar el comportamiento de su estructura. El cual indica que ésta tenía un grado de seguridad satisfactorio al momento de su construcción.

Los problemas principales observados en la estructura del retablo son atribuidos a la deformación que le ha impuesto el ábside de la catedral. Los hundimientos diferenciales han ocasionado que el arco triunfal del ábside se abra y arrastre la estructura del retablo provocando en él dislocaciones y fracturas en los elementos estructurales particularmente en la zona de la concha.

Los daños principales que presenta el Retablo de los Reyes han sido provocados por la deformación que experimenta la Catedral Metropolitana a causa de los hundimientos diferenciales, motivo por el cual el retablo ha sido objeto de importantes intervenciones a fin de preservar su integridad.

En general los esfuerzos que se producen en la estructura ante peso propio y ante sismo están por debajo de la capacidad de la madera, condición que ha permitido la conservación de la obra artística sin problemas graves.

El retablo ha tenido buen desempeño ante los sismos; sin embargo, es importante que después de cada evento de este tipo la estructura se revise. Los análisis muestran que las partes más vulnerables ante estos fenómenos naturales son las columnas estípites, por lo tanto, cada una de ellas debe ser revisada con sumo cuidado después de que suceda un sismo.

El Instituto de Ingeniería desarrolló un sistema que restringe la vibración de estas columnas, sin embargo, la conveniencia de su instalación debe ser evaluada por especialistas en restauración a fin de no alterar los valores plásticos del retablo.

El retablo de los reyes requiere de la formulación y ejecución de un plan de mantenimiento y manejo que garantice su permanencia en el curso de las próximas décadas. El primer objetivo de este plan debe cumplir las condiciones de limpieza en el conjunto a partir de sistemas de atención y supervisión permanentes.

También es importante implementar un programa exhaustivo de mantenimiento que permita que la madera logre conservarse en buen estado. Asimismo, es necesario atenuar el avance de los hundimientos diferenciales en la catedral para que la estructura del retablo no se deforme. En la medida en que se logren estas acciones, el retablo será capaz de soportar el paso del tiempo.

Para la conservación del Retablo de los Reyes se sugiere implementar las acciones siguientes:

- Impedir la destrucción parcial de su estructura para el paso de cualquier tipo de instalación
- Las instalaciones deberán diseñarse y construirse bajo estrictas especificaciones contra incendios
- Restituir la integridad de los elementos apolillados, dañados y faltantes, así como aquellos elementos mutilados por el paso de las instalaciones eléctricas
- Concluir la protección contra el fuego de la estructura del retablo
- Evitar utilizar el espacio entre los muros del ábside y el retablo como bodega, dado que dicho espacio se había empleado como almacén de alfombras y ornamentaciones religiosas que pueden incendiarse
- Restaurar las escaleras ubicadas en la parte posterior del retablo, algunos de los escalones se encuentran en mal estado.

REFERENCIAS

1. Fernández, Justino. "El Retablo de los Reyes: Estética del arte de la Nueva España". Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM, México 1959
2. Tovar de Teresa, Guillermo. "Gerónimo de Albás en la Catedral de México". Asociación Amigos de la Catedral Metropolitana, México 1990
3. Tovar de Teresa, Guillermo. "La Ciudad de los Palacios: Crónica de un patrimonio perdido". VUELTA, México 1992
4. Tovar de Teresa, Guillermo. "Retablo de los Reyes / Historia y Restauración". SDUE, México 1985
5. Cortés Rocha, Xavier. "Restauración de la Catedral de México". CONACULTA, México 2006
6. Cortés Rocha, Xavier. "El Retablo de los Reyes en la Catedral de México restauración por México y España". CONACULTA, México 2006
7. Lewis, Edward V. "Barcos". Ediciones Culturales Internacionales, 1985
8. Zienkiewicz O. C. "The finite element method". McGraw Hill International Editions, 1987
9. Wilson, E. "SAP90-Series of Computer Programs for the Finite Element Analisis of Structures. User's Manual". Única edición. Berkeley C.A., 1989

10. Jiménez, Edilberto J. "Análisis estructural de la torre sur-poniente de la Catedral de la Ciudad de México". Tesis que para obtener el título de Ingeniero Civil. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlan, UNAM, México 1997

11. Orozco, Bernardo. "Catedral Metropolitana de la Ciudad de México: Comparación entre la respuesta sísmica registrada y la obtenida de un modelo analítico". Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, México 2005

12. Robles, Francisco. "Estructuras de madera". LIMUSA, México 1986

13. American Society for Testing and Materials. "Standard methods of testing small clear specimens of timber". ASTM D 143-94