La Iglesia de forma arquitectónica libre, más grande la cristiandad

SANTUARIO DE LOS MÁRTIRES DE LA IGLESIA MEXICO

El proyecto de construcción consta de 185,000 m2. El santuario tendrá capacidad para unas 12,000 personas, pero en el gran atrio y plaza del frente podrán tenerse celebraciones para cerca de 50,000 personas.

Estructura de Luis M. Bozzo.
www.luisbozzo.com



Con 110 m de luz libre y de 65 m de altura, será una de las cúpulas más grandes de la cristiandad.

1. Descripción general

Este proyecto estructural del Ing. Luis Bozzo, único en el mundo, será un centro espiritual y de recogimiento para albergar las urnas de los mártires mejicanos. Además contará con una posta médica para labores humanitarias y otras labores religiosas.

Por sus dimensiones (más de 110 m de luz libre y más de 65 m de altura) será una de las cúpulas más grandes de la cristiandad, en particular, por su volumen total cerrado sin pilares intermedios. De hecho es la iglesia de forma arquitectónica libre de mayor dimensión de toda la cristiandad.

El proyecto arquitectónico realizado por GVA (Arquitecto José Manuel Gómez Vázquez Aldana) contempla tres cúpulas consecutivas (de forma libre) cerradas en su entrada principal por una cúpula semi-esférica. El trabajo consistió primero en geometrizar las "acuarelas" facilitadas por el despacho de arquitectos (para lo cual fue necesario el empleo del programa de simulación avanzada de la NASA denominado RHINO) y posteriormente analizar y dimensionar el conjunto, manteniendo los costos bajos a pesar de la enorme complejidad aparente.

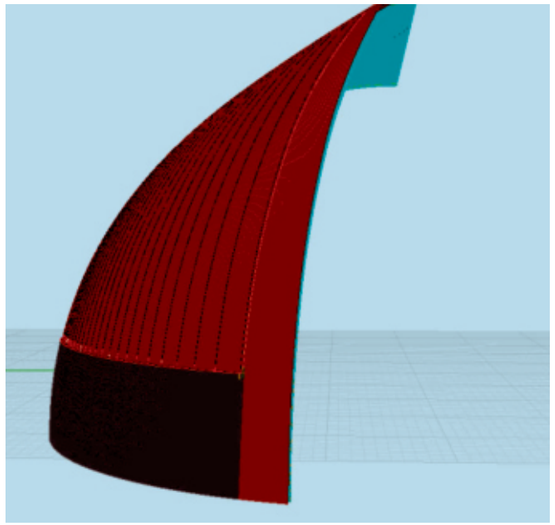
Este santuario está principalmente dedicado a todos los santos y beatos mártires mexicanos. Durante la Revolución Mexicana surgieron numerosos mártires principalmente entre los años de 1927 y 1929. A la fecha hay 26 santos y 24 beatos reconocidos por la Iglesia entre mártires de la persecución religiosa y misioneros de Japón y México. Al mismo tiempo se dispone de Columbarios donde depositar las cenizas de todas aquellas personas que deseen que sus retos descansen en suelo santo.

Todo el proyecto de construcción del Santuario de los Mártires consta de 185,000 m2 (techados estarán 160,000 m2). En la primera etapa se pretenden trabajar 25,716 m2. El Santuario tendrá capacidad para unas 12,000 personas, pero en el gran atrio y plaza del frente podrán tenerse celebraciones para cerca de 50,000 personas.

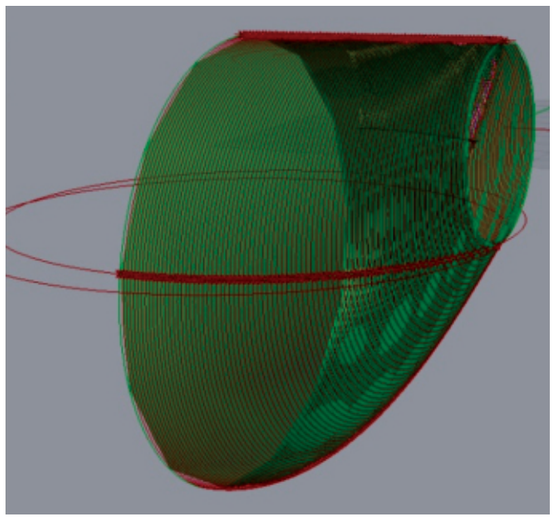
Las cúpulas son de formas libres, esféricas o cilíndricas, pero no se limitan a estas geometrías, con un voladizo de 30 m en la entrada principal. Esta forma libre compleja se resuelve de forma simple con arcos metálicos separados en el eje de la iglesia (cada 1.5 m) y diagonales que unen el cordón inferior y el superior; es decir, con la tipología de arcos en celosía. El peralte entre los arcos metálicos inferiores y superiores es de 1 m, por lo que se tiene una gran inercia con muy poco peso.

Un simple número permite comprobar que perfiles como los dispuestos para los arcos de estas cúpulas (tubulares 150x150x6) transfieren hasta 917 kn y para un arco con luz "2h" y altura "h" esta resistencia equivale aproximadamente a 3,35 hq siendo q la carga por m2. Igualando ambas y para una carga por m2 de 400 kg/m2 se obtiene una luz máxima teórica de 2h=137 m. Es evidente que estos cálculos son teóricos dada la esbeltez y pandeo del perfil 150x150x6 y aquí entra la teoría del "vigilante" que arriostra al arco y le dota de una gran inercia sin aumentar su peso. Es decir, los arcos superiores son el vigilante del arco evitando su pandeo y centrando las cargas para que éstas sigan siendo el anti funicular de las cargas. En la realidad tanto los arcos superiores como los inferiores trabajan conjuntamente evitando el pandeo por compresión obteniéndose una estructura metálica muy ligera de solo 50kg/m2 de acero laminado.

Las siguientes imágenes muestran el proceso de "geometrizar" la compleja forma inicial mediante el programa Rhino para cada una de las tres cúpulas (la cúpula de la entrada es la única simple dado que es un casquete esférico).



En esta imagen se muestra el diseño paramétrico de la cúpula C1 que permitía modificar toda la geometría de forma simple. Es decir, mediante un modelo paramétrico se podía cambiar un parámetro (tal como la altura de la cumbrera), y de forma automática se cambiaba la geometría de todas las miles de barras que forman la estructura final del modelo de cálculo estructural.



Por tanto, se disponen de arcos cada 1,5 m según el eje de la iglesia, lo cual origina que en los bordes en voladizo éstos no vayan de muro a muro. En dichas zonas se ubican, por tanto, arcos espaciales inclinados que rematan todos los bordes en voladizo. Entonces, el mecanismo de carga es simple en cuanto a tener arcos verticales que van de muro de concreto a muro de concreto, y otros que se apoyan en arcos inclinados que transfieren la carga del voladizo a los muros. En cuanto a los muros de concreto estos son de 1.2 m de espesor de forma curva en ambas direcciones.

La cimentación de la iglesia se ubica en la cima de una montaña de origen volcánico. Por ello, el suelo es muy heterogéneo con rocas ligeras tipo pomex, con zonas de grandes rocas basálticas muy duras apoyadas en zonas blandas. Para prevenir asentamientos diferenciales se dispuso de una cimentación rígida en forma de herradura con una previa mejora del terreno mediante columnas de micro pilotes de concreto. Una sección tipo se muestra a continuación observándose en los laterales las distintas capas de terreno.

Para contrarrestar el empuje horizontal de los arcos se dispuso hormigonar directamente sobre el terreno lateral, tal como se observa en la fotografía anterior. En algunas zonas esto originaba una merma excesiva de material y por ello se dispuso de encofrados. Por otra parte, de forma adicional, se emplearon tres tensores postensados que ataban la cimentación de lado a lado y evitaban su tendencia a abrir.

Vista del altar con muro curvo aligerado. Un aspecto a destacar es el muro posterior al altar con altura de casi 50 m y espesor de solo 60 cm. Para ello se dispuso de una forma curva en planta y en altura muy eficiente para su comportamiento en voladizo vertical. De forma adicional se conectó el muro mediante seis perfiles a los arcos posteriores, de forma tal de uniformizar desplazamientos y evitar rotura de vidrios en la fachada posterior.

2. Calculo Estructural y Proceso Constructivo

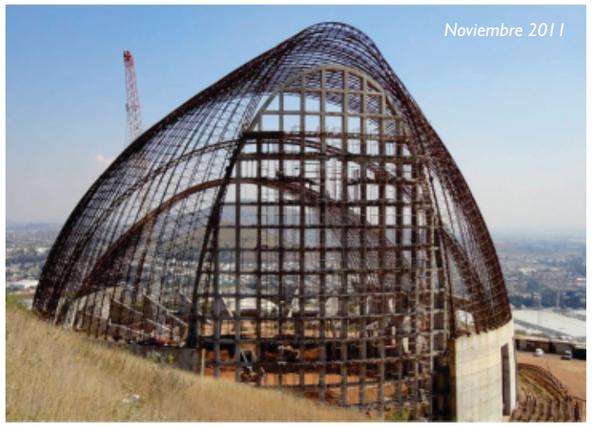
Una estructura de esta complejidad requiere el desarrollo de diversos modelos de cálculo, desde los más simples para predimensionar espesores y secciones de arcos individuales hasta modelos de cúpulas trabajando conjuntamente. Para ilustrar la complejidad consideremos la cúpula C1, C2 y la semi-esfera de la entrada. Para este modelo conjunto se necesitan de 30,529 barras, 12,525 nudos y 14,882 elementos finitos. En números globales se trata de disponer de aproximadamente de 50,000 barras de distinta longitud.



Mayo 2011









Se realizaron modelos individuales de las cúpulas para determinar su respuesta frente a cargas verticales y de viento para posteriormente verificar la respuesta conjunta, modelando los elementos de unión entre ambas cubiertas que corresponden a las vidrieras y su estructura de apoyo. Este cálculo conjunto fue necesario porque es habitual en diversas estructuras de grandes luces de hace algunos años, ver como se produce la rotura habitual de vidrios motivo de cargas laterales de viento o incluso por efectos térmicos. (Cúpulas de Candela, Iglesia de Niemeyer en Brasilia, "Pentágono-Peruano" en Lima, entre otras).

Con relación a las cargas se consideró el peso propio de los perfiles más 50kg/m2 debido a la cubierta ligera tipo "Kalzip" y su estructura secundaria de apoyo junto con 60kg/m2 de carga de mantenimiento o elementos permanentes colgados (luces, instalaciones de sonido, entre otros). La carga de viento se consideró según normativa local de forma perpendicular a su superficie, tal como se muestra a continuación para la semi-esfera de la entrada:

Finalmente, con respecto al modelo de cálculo, un aspecto importante es la transición entre los arcos separados a eje de 1 m y el muro de concreto de 1,2 m de espesor modelado con elementos finitos tipo losa. Dado que el modelo es a eje se requiere una triangularización especial para unir ambos elementos, tal como se muestra a continuación.

Dado el gran cambio de rigidez entre el muro de concreto y los perfiles metálicos, se dispuso un elemento de transición no representado en el cálculo, pero si presente en el buen comportamiento conceptual de muchas estructuras de la década de los 50 ó 60 basadas en "más concepto" y "menos cálculo". Para reforzar esta transición se dispuso de que en 1.5 m del extremo superior de los muros de concreto, se ubicaran perfiles con barras corrugadas soldadas correspondientes a los arcos superiores. Es decir, los arcos metálicos terminaban en crucetas en forma de cruz con platinas horizontales a nivel del concreto, y por debajo se volvían a disponer de los mismos perfiles en una longitud de 1,5 m. De esta forma se reforzaba la transición, lo cual siempre es conveniente en particular para zonas sísmicas. Adicionalmente permitía disponer de placas metálicas horizontales (no inclinadas según la perpendicular al eje de los arcos) simples de ejecutar.

El proceso constructivo de las cubiertas se realizó sin encofrado ni apuntalamiento interior alguno. Las piezas se fabricaron a pie de obra, soldándose las barras entre si, mediante platinas de unión para posteriormente ser izadas con grúas móviles. El peso máximo izado fue de poco más de 100 Ton, aunque en general se trabajó con piezas de 20 Ton ó 30 Ton. Esta limitación se daba no solo por la distancia horizontal a mover sino, por la altura de trabajo cercana a los 50 m en la mayoría de casos. Las siguientes imágenes muestran diversas etapas de la obra: