



LA MADERA LAMINADA APERNADA, CUBIERTA DE LA BASÍLICA DE PÁTZCUARO, MICHOACÁN. MÉXICO.

THE LAMINATED WOOD BOLTED, THE BASILICA'S ROOFING OF PÁTZCUARO, MICHOACÁN. MÉXICO.

Navarrete Padilla René

⁽¹⁾ Dr. Arq. Departamento de Arquitectura, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

* Contacto: René Navarrete Padilla, rene@ugto.mx

CÓDIGO: 4617754

Resumen

Introducción: Si concebimos en su comportamiento a la madera laminada como una sola unidad, basándonos en la unión que garantizan los pegamentos utilizados hoy en día, el análisis de una estructura laminada sin pegamento sino a través de uniones mecánicas reviste singular importancia para la solución de otros cometidos que requieren de la laminación

Metodología: A través de la investigación histórica y de los resultados obtenidos en una simulación mecánica, se presentará la concepción del diseño, construcción y comportamiento estructural de la estructura de cubierta de la Basílica de Pátzcuaro

Desarrollo: Madera laminada apernada, tecnología centenaria aplicada una estructura que se basa en arcos laminares unidos con elementos mecánicos: pernos, cinchos, sin pegamento, Ubicando el edificio en el tiempo y en el espacio se trata de un inmueble del siglo XVI, a alrededor de los mil quinientos... cuatrocientos años...¿O de que antigüedad?, ¿Uniones mecánicas, sin pegamento?, ¿Cómo se comporta?, ¿La madera laminada no es acaso una tecnología actual?,

Conclusiones: El análisis de la cubierta de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud da la base para otras investigaciones sobre madera laminada apernada pues, aunque de momento no exista ninguna norma o regla de cálculo para este tipo de estructuras, cierto es que esta tipología responde satisfactoriamente a los requerimientos solicitados, tanto desde el punto de vista arquitectónico, como el estructural.

Palabras-clave: madera laminada, uniones mecánicas

Abstract

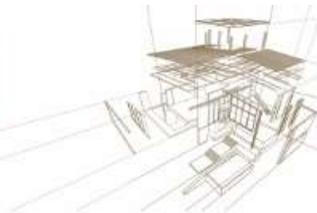
Introduction: If we conceive of laminated wood as a single unit, basing on the bond that guarantees the glues used today, the analysis of a laminated structure without glue but through mechanic joints is of particular importance for the solution of other tasks that require lamination

Methodology: Through historical research and the results obtained in a mechanical simulation, the conception of the design, construction and structural behavior of the roof structure of the Basilica of Patzcuaro will be presented.

Developing: Laminated bolted wood, century-old technology applied a structure that is based on laminar arcs joined with mechanical elements: bolts, webbing, without glue. Locating the building in time and space is a 16th century building, around fifteen hundred ... four hundred years ... Or how old? Mechanical joints, without glue? How it behaves?, Is laminated wood not a current technology ?,

Conclusions: The analysis of the roof of the Basilica of Our Lady of Health, gives the basis for other research on laminated wood bolted, because although there is no rule or rule of calculation for this type of structures, it is true that this typology responds satisfactorily to the requested requirements, both from the architectural point of view, as the structural one.

Keywords: laminated wood, mechanical joints



1. INTRODUCCIÓN

Es un caso especial, por tratarse de una solución constructiva única en el territorio michoacano y posiblemente difícil de encontrar en otras partes de nuestro país.

La iglesia de Pátzcuaro, obra ideada por Vasco de Quiroga, tiene en la actualidad una cubierta que fue colocada entre 1872 y 1883, periodo en cual se realizaron fuertes obras de remodelación, y que coincide con la etapa temporal en la cual fue ideado por M. Emy este sistema.

Esta cubierta está elaborada con arcos laminares, alfardas, jambas verticales de contrarresto (jabalcones), tirante horizontal y cruceros construidos de madera; pernos y estribos de elaboración metálica. El claro que libra en total es de 16.40 metros de paño a paño interno, apoyándose el sistema sobre una superficie que se logra a través de un escalonamiento en el muro con una amplitud medida de 1.20 metros cada uno; a esto debe agregarse la porción complementaria de muro y pretil que alcanzan 2.10 metros de espesor en cada lado, con lo cual se tiene una amplitud, a paños exteriores de 23.00 metros, los muros en total tienen un espesor de 3.30 metros medidos en la base donde nacen los arcos que son segmentos de círculo de casi 8.20 metros de flecha medida al intradós. Del intradós a la cumbre (la parte más alta al exterior de la cubierta) se miden 5.25 metros de altura, con lo cual se alcanzan 13.45 metros de longitud, medida desde la cuerda hasta la cúspide de la cubierta. [Torres, 1999].

Siendo un sistema único en el país, es que se analiza desde el punto de vista mecánico con el propósito de proporcionar la mayor información posible que permita su conocimiento y socialización en aras de ayudar en otras soluciones actuales.

2. METODOLOGÍA

Por lo anteriormente mencionado se presenta una descripción de la cubierta y sus elementos en una primera parte y un resumen del análisis mecánico de la cubierta en un segundo momento.

2.1 Descripción de la cubierta

La revisión se realiza por analogía, abordando como antecedentes el sistema ideado por ingeniero militar M. Emy, ya que se considera que el autor anónimo de la obra en Pátzcuaro aplicó este sistema atendiendo a los requerimientos que deberían cubrirse. (Fig.1)



Fig.1 Armadura Emy. [Mendez, 1996]



Se desconoce quién fue el constructor de esta obra; sin embargo, es notorio el conocimiento de causa que le permitió decidir su aplicación.

Este sistema, aplicado en la Basílica de Pátzcuaro, está construido por medio de arcos formados por tablonces, solución única en la región y en el país. Por esta razón y dadas sus virtudes estructurales, merece un análisis especial donde se pongan de manifiesto sus características y condiciones de diseño.

El análisis se presenta a través de una revisión por analogía con el tipo de solución francesa ideada por el Ing. Militar M. Emy para cubrir un claro de 20 mts. En un cobertizo para usos agrícolas. (Fig.2)

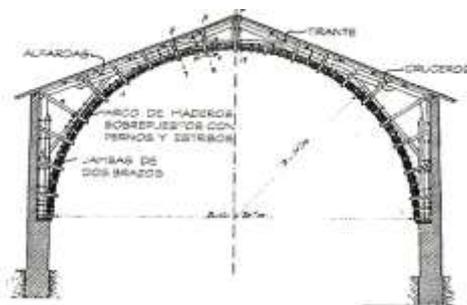


Fig.2 Estructura de M. Emy en Francia para un claro de 20 m. [Torres, 1999]

Esta solución parece, por los datos obtenidos, haber sido el modelo de la aplicación en la Basílica de Pátzcuaro, buscando terminar con los desastres anteriores, motivados por constantes movimientos sísmicos.

El sistema ideado por Emy, denominado como estructura de arcos formados por tablonces curvos sobre su plano horizontal, está compuesto por largos maderos de pino, superpuestos entre sí a manera similar como se colocan las muelles de suspensión de un carro y cuya forma es curva sobre el espacio que se pretende cubrir.

La forma de unir esta sucesión de láminas de madera es por medio de pernos y estribos metálicos, colocados los primeros a través de una perforación central y los segundos abrazando los maderos para lograr la sujeción. (Fig.3)

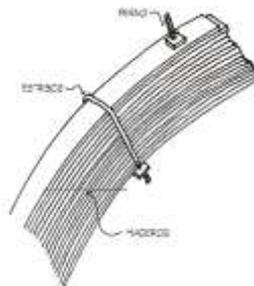


Fig.3 Sistema de M. Emy. [Torres, 1999]

Cuando los maderos no son suficientemente largos para formar el arco de una sola pieza, se ensamblan en liga, teniendo cuidado de que las juntas no tengan coincidencia con los riñones cuando se trata del extradós ni en la cúspide del arco, cuando se trata del intradós.



Los pernos, cuya longitud depende del espesor del arco están espaciados a cada 0.80 mts. , de eje a eje con un diámetro de 19 mm. Los estribos se colocan en los intervalos de los pernos para componer el conjunto de elementos de sujeción de los maderos, dando la forma deseada del arco.

Sobre cada uno de los arcos descritos, se colocan vigas a manera de alfardas y jambas verticales de contrarresto llamadas jabalcones (Fig.4), armadas de dos brazos tensores y de un tirante horizontal que funciona a manera de nudillo; cierran el sistema, una serie de cruceros colocados normalmente al arco.



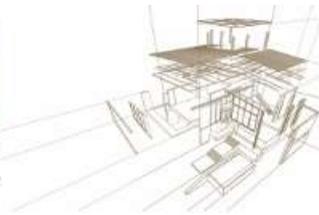
Fig.4 Jabalcón (jambas), y estructura actual[Torres, 1999 – dibujo propio]

El arco es entonces la pieza principal de todo el conjunto y es en su forma y disposición constructiva que reside la fuerza de sustentación y las demás ventajas inherentes a su gran capacidad de soporte y alcance de claro libre. [Torres, 1999]

Las jambas de dos brazos (jabalcones), se ubican a una distancia de 10 centímetros de los muros, pero los tres primeros cruceros de cada lado, se prolongan más allá de éstas, penetrando 20 centímetros en compartimientos, preparados en los muros, de 30 centímetros de profundidad. Esta solución no persigue apoyarse en la mampostería de los muros ya que la estructura descrita no produce esfuerzos. Se trata exclusivamente de mantener los maderos en planos verticales y de impedir el balanceo de la estructura en el sentido de la longitud del edificio. Además de que en dicho sentido, un aporte importante para la estabilidad lo da el punto central del ábside y el apoyo de la hilera principal en el muro de fachada.

Los cruceros, los estribos y los pernos hacen que cada una de las componentes laminares del arco trabajen solidariamente unas con otras para presentar oposición contra la natural tendencia a enderezarse.

El arco se conforma de 18, 24 y 14 tablonces de manera simétrica, en donde a partir de los apoyos, los primeros cuatro tramos que conforman los cruceros constan de 18 piezas de 5"x 1", originando una sección compacta de 5"x 18"; el siguiente tramo está constituido por 24 tablonces de igual escuadría, formando entonces una sección de 5"x



24" y por último los ocho tramos restantes se disminuyan a 14 tablones, por tanto se tiene una sección de 5"X 14".

Destaca en la solución de la Basílica, el refuerzo en el área de los riñones para mejorar las condiciones estructurales y la disminución de componentes entre los riñones para propiciar un aligeramiento y disminuir los pesos propios del arco, aspecto que quizás proporcionó al constructor de esta cubierta, la posibilidad de eliminar los brazos tensores. [Torres, 1999]

Las jambas o jabalcones, en este caso, están colocadas ligeramente inclinadas al exterior, son más cortas y permanecen al igual que el modelo francés, flejadas por medio de estribos metálicos y encachetadas por medio de cortes diagonales y transversales para evitar el deslizamiento. (Fig.5)



Fig.5 Jabalcón actual. [Méndez, 1999]

En relación con las alfardas, (Fig.6) éstas se ubican con una inclinación sensiblemente mayor, mientras el modelo de Emy mantiene una inclinación de 28 grados, lo cual motiva las jambas más alargadas al igual que los muros, el caso local es de 42 grados de inclinación, propiciando vertientes sumamente peraltadas y jambas o jabalcones cortos (3.80 metros) El refuerzo de las alfardas se soluciona de igual manera, a través de los estribos metálicos repartidos a los lados del refuerzo que también se ensambla por medio de cortes diagonales y transversales para formar escalonamientos que evitan los deslizamientos. [Torres, 1999]



Fig.6 Alfardas. [fotografía propia]

El tirante tangencial al extradós del arco, es un elemento permanente al igual que el diseño de origen, se enlaza con las alfardas y cruceros que componen el sistema, los ensambles se solucionan a través de cortes a media madera encachetando las piezas por ambos lados y sujetándolas por medio de pernos metálicos.



Otros aspectos importantes que deben ser mencionado es el concerniente a la conformación constructiva en el área del ábside. Con toda habilidad se conformaron medios arcos colocados en forma radial, siguiendo el recorrido circunférico del presbiterio. En la cúspide, donde confluyen estas mitades de arcos y coinciden con el primer arco transversal de la nave, se forma un trompo también construido de madera, el cual funciona a manera de llave para recibir las estructuras y cerrar el sistema de arcos. (Fig.7)



Fig.7 Ábside. [fotografía propia]

Complementan el sistema, largueros de vertientes, hilera, fajillas y tejas; estas últimas, por razón de las vertientes sensiblemente inclinadas, están elaboradas con tacones en los extremos para enlazarse entre ellas mismas y las fajillas.

2.2 Análisis estructural de la cubierta

Esta cubierta como se comentó está realizada con arcos laminares, alfardas, jambas verticales (jabalcones) y tirante horizontal; todo de madera y unido con pernos y estribos de elaboración metálica. El claro que libra en total es de 16.40 metros de paño a paño interno, apoyándose el sistema sobre una superficie que se logra a través de un escalonamiento en el muro.

El arco laminar, elemento principal de la estructura se conforma por tablonces curvos sobre su plano horizontal compuesto por largos maderos de pino, superpuestos entre sí y unidos con pernos y estribos metálicos, colocados los primeros a través de una perforación central y los segundos abrazando los tablonces.

Sobre cada uno de los arcos descritos, se colocan vigas a manera de alfardas, que dan forma a la doble vertiente exterior y jambas verticales llamadas jabalcones, armadas de dos brazos tensores y de un tirante horizontal que funciona a manera de nudillo; cierran el sistema, una serie de cruceros colocados normalmente al arco. (Fig.8)



Fig.8 Partes componentes. [fotografía personal]

En cuanto a las dimensiones de los elementos, presenta diferentes secciones y detalles constructivos ilustradas en la siguientes figuras:

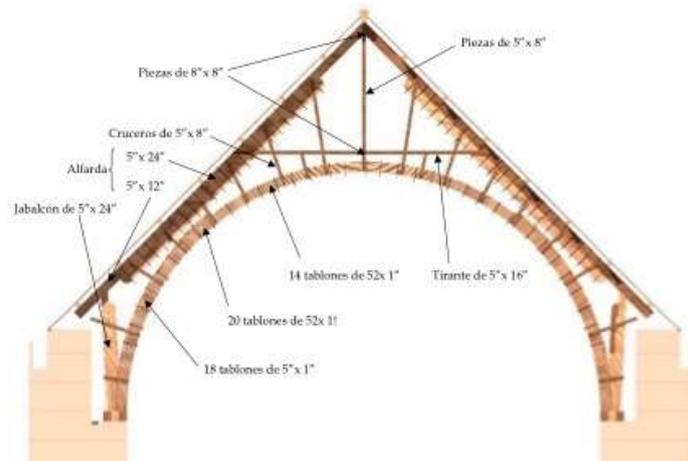


Fig. 9 Dimensiones de los componentes. [dibujo propio]

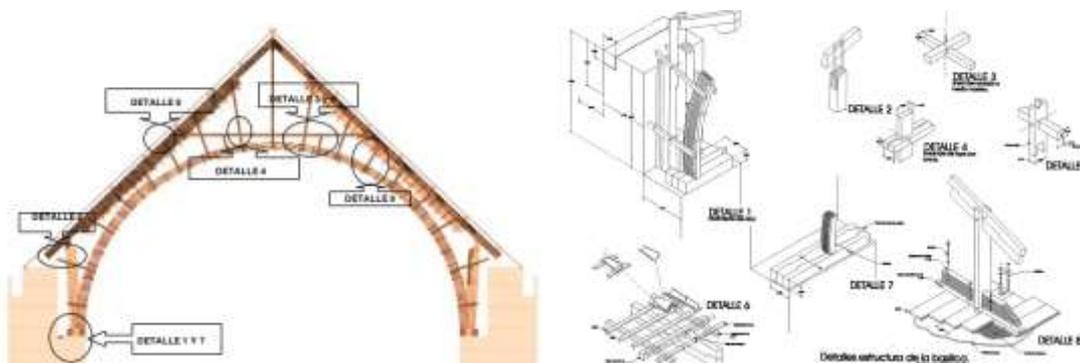
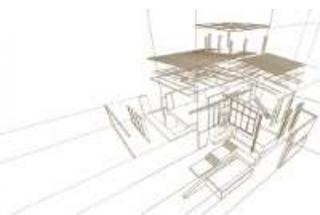


Fig.10 Detalles constructivos. [dibujos propios, Méndez, 1996]

Tanto arco, jabalcones, alfardas y tirantes son piezas que trabajan como secciones integras en si mismas y por tanto así se modelaron; en tanto los cruceros se articulan con sus correspondientes enlaces en el plano de la armadura, quedando restringidos en los otros dos planos.



Con la información anterior se modela la estructura en el sistema computarizado en el programa AVwin 98, plusV2.0 que permite conocer las distintas tensiones a las que se someten los miembros componentes y asimismo realizar la verificación de las secciones, y finalmente se verifican algunas secciones representativas del sistema a través del programa de cómputo “Diseño y verificación de piezas estructurales de madera según NCh. 1198 Of.91”, elaborado por Cecilia Poblete Arredondo, arquitecto y Mario Bravo Molina, Ing. informático.

Para la modelación se establecieron tres consideraciones:

El peso propio, donde se considera además del peso del material mismo, todos aquellos que contiene la estructura misma: teja, yeso, etc.

La sobrecarga, considerándose esta solo sobre los tirantes y viga longitudinal que corre a la misma altura de aquellos; sitios donde únicamente es posible que esta exista, por la morfología misma de la estructura.

El viento, donde se estimó con una presión básica de 80 kg/m

Aquí un par de imágenes representativas del análisis en el programa:

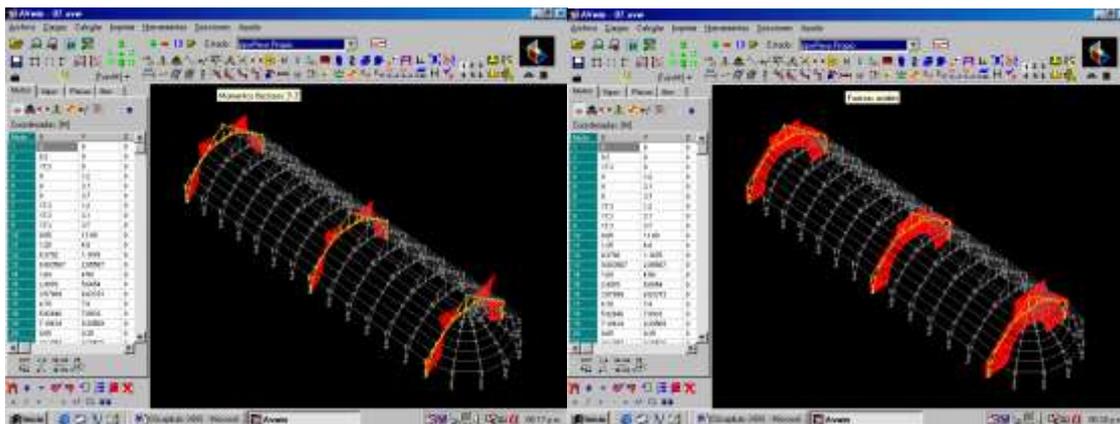


Fig.11 Momentos flectores alrededor de 3, siendo 3 un eje paralelo al longitudinal de la cubierta y Fuerzas axiales. [AVwin 98, personal]

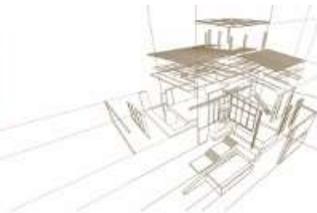
Ahora bien, una vez identificados todos los datos y modelados en el programa, además de obtener los resultados completos del análisis estructural se procedió a la verificación de secciones con el programa ya mencionado.

La secuencia en como se presentan los resultados es la siguiente:

En primer lugar los datos correspondientes al primer arco, que corresponde al arco que recibe los medios arcos que conforman el ábside. En segundo lugar los datos de verificación del arco central, que corresponde precisamente al arco situado en la zona media de toda la estructura, se toma este al observar la totalidad de los resultados y darnos cuenta que este representaba los arcos intermedios. En tercer lugar el último arco, que es el situado al final de la estructura, aquél que ya no continúa más allá y presenta una diferencia de cargas con respecto al resto de los arcos.

Y finalmente los medios arcos del ábside, en los que sobra decir son solo mitades de los restantes y por tanto con solicitaciones diferentes.

Las características generales de la madera que se verificó fueron las siguientes:



Especie: Pino Oregón

Grado: 3

Contenido de humedad: <30%

Grupo: ES5

Clase: F11

Se verificaron los siguientes efectos: flexión, cizalle, compresión axial, tracción axial y torsión.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los anteriores resultados es obvio comentar que todos y cada uno de los distintos elementos que conforman la estructura, cumplen satisfactoriamente con las exigencias de la norma chilena, no se debe olvidar que las verificaciones se hicieron proponiendo un grado 3 para la calidad de la madera, no obstante tratarse de una madera de mejor calidad, pues en una observación ocular de la misma, sin llegar a realizar una clasificación rigurosa es innegable que la madera allí utilizada es de calidad superior.

En todas las verificaciones efectuadas la tensión de trabajo fue inferior a la tensión de diseño, en ningún caso esta última se vio rebasada y esto posibilita a pensar que si se realizara una obra igual a la del presente trabajo, con una madera de mejor calidad, sería posible disminuir las secciones, con lo que la carga transmitida a los muros sería rebajada; sin embargo este último tema parece no ser problema al observar la robustez de los muros de la basílica, no se olvide que originalmente se pensó en cubrirla con bóvedas de crucería.

En este capítulo se describió de manera detallada todos y cada uno de los elementos que conforman la estructura de la cubierta, así como las características del material, de tal forma que fue posible modelarla en el programa de AVwin y una vez realizado los análisis estructurales de la misma se pudo conocer las distintas tensiones a las que se someten los miembros componentes. La totalidad de los resultados arrojados por el análisis se presentan en el apéndice A al final del trabajo, por razones de tamaño se entrega dicha información en un disquete, puede ser leída a través de cualquier procesador de texto.

Posteriormente se realizó la verificación de las secciones, en el programa de Diseño y Verificación de secciones según NCh 19998 Of. 91, y se observó que es posible proponer disminuir la esquadría de las secciones, siempre y cuando se trabajase con una grado de madera de mejor calidad, lo anterior con el objeto de disminuir peso y volumen de la cubierta, lo que repercutiría en costos por mencionar un caso.

4. CONCLUSIONES

La cubierta de esta basílica, es un fenómeno constructivo, que merece una atención especial, por la necesidad de la comprensión de la tecnología, pues a través del estudio de la misma, se aporta al conocimiento de la misma.



El análisis de la cubierta de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, da la base para otras investigaciones sobre madera laminada apernada, pues aunque de momento no exista ninguna norma o regla de cálculo para este tipo de estructuras, cierto es que esta tipología responde satisfactoriamente a los requerimientos solicitados, tanto desde el punto de vista arquitectónico, como el estructural. Pero además, existen otras tantas construcciones en madera, construcciones olvidadas por la invasión del cemento y el acero.

La cubierta actual, con intradós cilíndrico, se inspiró en soluciones tomadas de tratados franceses, aunque adaptada con gran ingenio. Ahora bien, respecto al análisis estructural y a la verificación de las secciones realizada en el presente trabajo viene a demostrar la amplia experiencia que el constructor tenía sobre el material madera y sus características, pues evidente es su adecuación con un profundo conocimiento del comportamiento del sistema. No perder de vista que se trata de un elemento laminar apernado, ejecutado in situ, gran diferencia con respecto a la madera laminada encolada.

Debo comentar que la posibilidad de analizar concienzudamente este tipo de madera laminada (apernada) es un reto para profundizar en su estudio y análisis, pues presenta una tecnología rescatable en la medida que se avance en su conocimiento. El hecho de prescindir del pegamento para el laminado y por tratarse de una estructura que puede elaborarse en el sitio, justifica la acción de voltear atrás en el tiempo para conocerla, estudiarla y utilizarla.

Sin embargo, no basta con tener experiencia en el uso de la madera, se requiere un conocimiento profundo del comportamiento estructural que tiene y debemos aprovechar los avances de la tecnología para ello.

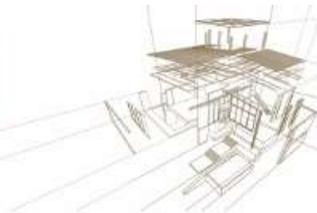
No caigamos en el error de que por tener al alcance una tecnología superior, debemos considerarnos poseedores de un conocimiento mayor, Esta cubierta nos dice lo contrario o al menos nos hace una llamada de atención para considerar esta tecnología de laminado sin pegamento, como una posibilidad de solución factible y confiable.

Hace falta estudiar más al respecto de la madera laminada apernada, con el ánimo de rescatarla ya que el conocimiento a detalle de todos y cada uno de los elementos que conforman la estructura de la cubierta y de las así como las características del material, permitió la modelación en el programa de AVwin, modelación que trato de responder lo más fielmente posible a las características de cada uno de los elementos y a la cubierta en general.

Y considero que de acuerdo a los datos obtenidos, tanto en el análisis estructural, como en la verificación de las secciones, permite asegurar que la modelación responde en un alto porcentaje a lo que ocurre en la realidad y por lo tanto es posible establecer conclusiones al respecto.

Posteriormente con la verificación de las secciones, en el programa de Diseño y Verificación de secciones según NCh 19998 Of. 91, se comprobó que se cumple cabalmente dicha norma.

Esto permitió proponer una disminución de la esquadría de las secciones, mejorando la calidad de la madera, lo anterior con el objeto de disminuir peso y volumen de la cubierta, con el único propósito de hacer un análisis comparativo entre ambas soluciones.



Esto no fue otra cosa que una serie de aproximaciones a rediseñar las distintas secciones que componen la estructura con el propósito de aprovechar el conocimiento que el estudio que esta estructura deja en su análisis estructural.

Para ello se procedió de forma inversa a como se realizó el estudio, es decir se partió de los resultados comparativos entre las tensiones de diseño y las tensiones de trabajo, y a partir de allí, se encontraron secciones transversales para cada uno de los elementos, con estas obtenidas procedió a modificarlas en el programa de análisis y se recalcularon las fuerzas actuantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bassegoda Nonell, Juan. (1976). Historia de arquitectura. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, España.

Bérchez, Joaquín. (1992). Arquitectura mexicana de los siglos XVII y XVIII. (col. Arte Novohispano). Azabache. México.

Instituto Nacional de Normalización, INN. (1991). Norma Chilena: NCh 1998 Of.91. Madera – Construcciones en Madera – Cálculo. Santiago, Chile.

Kubler, George. (1948). [Arquitectura mexicana del siglo dieciséis] Mexican architecture of the sixteenth century. Tomo I y II. Greenwood Press, Publishers. Westport, Connecticut, EUA.

Méndez, Francisco. (1996). Basílica de Nuestra Sra. De la Salud, plano corte transversal y detalles para el Proyecto de Restauración de la Cubierta Principal. Pátzcuaro, Mich., México.

Poblete Arredondo, Cecilia. (2000). Adaptación del sistema chileno de normas para el cálculo de construcciones en madera. Memoria de tesis. Université Catholique de Louvain. Bélgica.

Torres Garibay, Luis Alberto. (1999). Tecnología constructiva en la zona lacustre de Pátzcuaro y región Morelia. Universidad Mchoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. México.

SOPORTE LÓGICO

Arredondo Poblete, Cecilia. (2000). Diseño y verificación de piezas estructurales de madera según NCh 1198 Of.91. Programa para computador. Concepción, Chile. PC.

AVwin 98, plusV2.0. (1998). Programa para computador. Avansse International, Inc. Columbia MD, Estados Unidos de América. PC.