

## EL USO DE MADERA EN ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS PATRIMONIALES – REHABILITACIONES EN PARAGUAY

### I. RESEÑA HISTÓRICA

La madera como material de construcción se ha destacado a lo largo de la historia de la humanidad como un noble y resistente material. Las estructuras de madera se comportan y se han comportado de una manera privilegiada.

De acuerdo a los registros históricos de los distintos usos dados a la madera en la construcción de viviendas, se destacan los sistemas constructivos artesanales, los cuales han demostrado ser muy efectivos para las herramientas y técnicas constructivas conocidas de cada época.

Haciendo un recorrido histórico, se destacan las siguientes obras en madera:

#### **VIVIENDAS Y EDIFICIOS**

Desde los años Antes de Cristo

- Palafitos y chozas.
- El Arca de Noé con madera de Ciprés se menciona en Génesis.
- Una Nave solar enterrada al pié de la Gran Pirámide para viaje del Faraón hacia la eternidad, en Egipto.

En la Edad Antigua:

La compactación de terrenos con pilotines de madera, en China, (4000 a. C.).

- Las primeras formas de techo de madera, aparecen en Asiria.
- Los entramados de madera combinados con barro, para techados, son utilizados en la antigüedad.
- Las cubiertas, en la antigua Grecia y Roma.
- Los entramados de madera para pisos, encontradas en el Coliseo de Vespaciano.

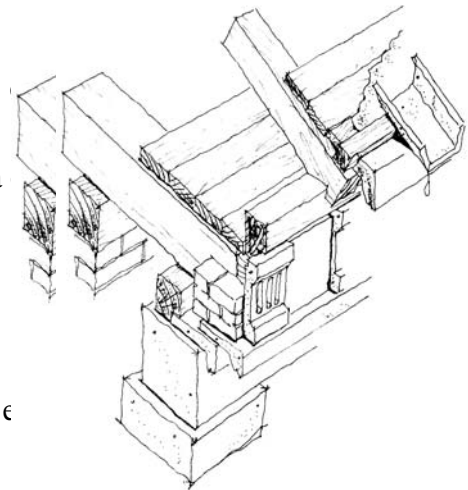
En la Edad Media:

Cubiertas y fundaciones con pilotes de madera.

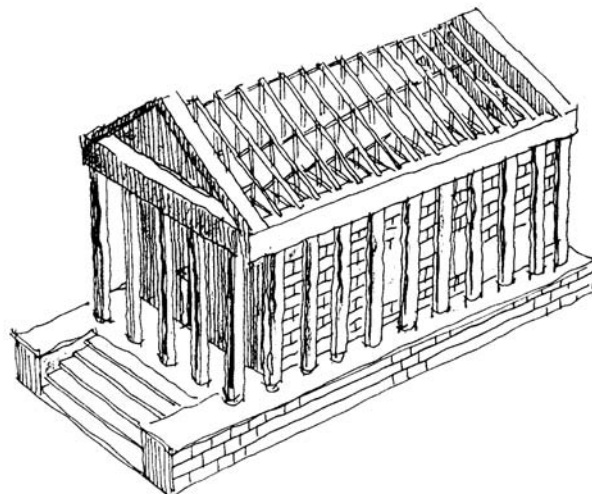
En el Renacimiento:

Con Leonardo y Galileo aparecen los estudios estáticos para el diseño estructural de piezas de madera.

En el siglo XVII:



*Estructura de entrepiso –  
Fuente: Abasolo Sánchez.*



*Cubierta leñosa de un templo romano –*

*Fuente: Abasolo Sánchez*

Filiberto de l'Orme construye el primer arco de madera

En el siglo XVIII:

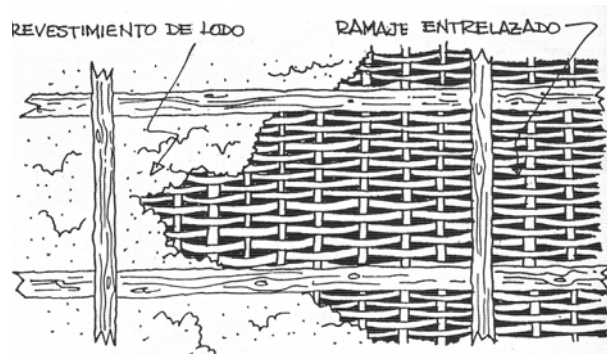
Blondell enuncia sus “Reglas empíricas para el dimensionado de tablestacados, pilotes y cajones de madera. Aparecen las primeras fundiciones y perfiles doble T de hierro laminado, con lo que deviene el uso de las estructuras mixtas de madera y hierro.

En América, desde la época precolombina, toda construcción de vivienda tenía como estructura, piezas de madera, en su estado natural.

En estas imágenes se observan algunos sistemas constructivos de uniones, cerramientos y como estructura para paredes de adobe.



Vivienda Primitiva con estructura de madera.  
Fuente: Robles Fernández-Villegas

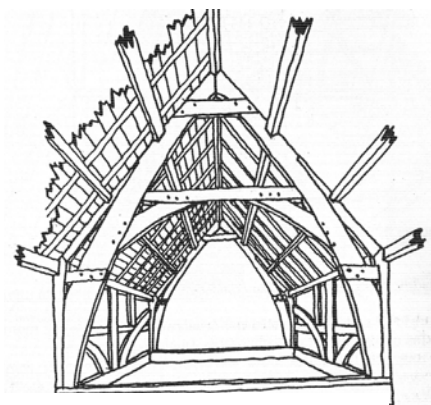


Cerramiento con estructura de ramaje entrelazado y revestimiento de lodo. Fuente: Robles Fernández-Villegas

En épocas posteriores se fueron incorporando técnicas y conocimientos acerca del comportamiento de la madera utilizándose madera aserrada y distintos tipos de uniones con rebajes, con tacos, con pasadores, etc

En la Edad Media se encuentran registros históricos de estructuras mas elaboradas, las que fueron estudiadas y calculadas con piezas de madera aserrada.

Entre otras se pueden ver en la figura adjunta, la estructura de techo de una casa inglesa, (Fernández Robles).



Estructuras de techo – casa inglesa  
Fuente: Robles Fernández-Villegas

En la edad Moderna, siglo XIX:

Se construye una cabriada de tablas de madera curvada encolada. Es la primera solución de madera laminada encolada, aunque aun poco efectiva por el uso de colas poco estables ante la presencia de agua.

La fabricación en 1870 del primer cemento artificial, genera el advenimiento del hormigón armado, con lo que se origina una importante corriente de construcción diferente, con técnicas más avanzadas y materiales no tradicionales hasta entonces.

En el siglo XX:



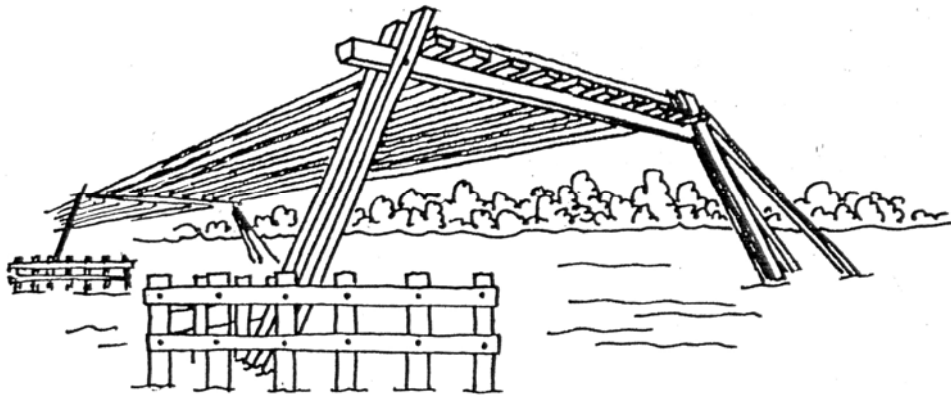
Estructura de madera encolada  
Fuente: Abasolo Sánchez

Hacia 1940, el uso generalizado del acero y del hormigón armado desplaza al de la madera.

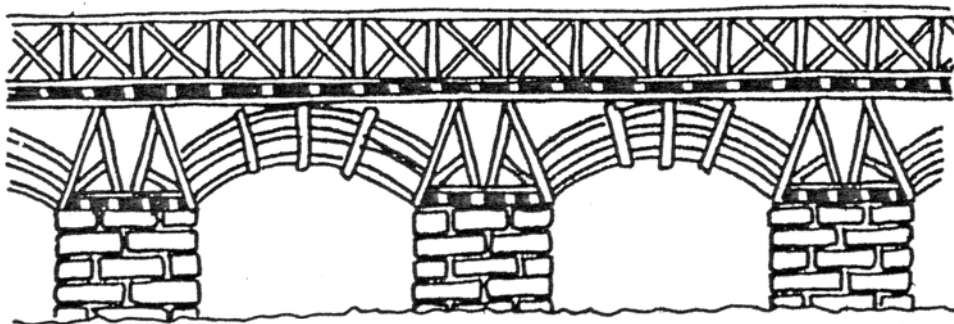
Sin embargo, alrededor de 1959 aparecen las primeras resinas sintéticas y protectores estables lo que permite el resurgir y florecimiento de la madera laminada encolada como material para la construcción de estructuras de madera.

## PUENTES

Merece hacer una mención especial el uso de la madera en la construcción de estructuras de puentes desde la época de los romanos.



*Puente de Julio Cesar sobre el Rhin  
Fuente: Robles Fernández-Villegas*



*Puente de Trajano sobre el Danubio  
Fuente: Robles Fernández-Villegas*

## II. REVALORIZACIÓN DE EDIFICIOS Y OBRAS DE INTERÉS HISTÓRICOS

La revalorización de los Edificios con gran importancia histórica está ahora en la agenda de las organizaciones internacionales, interesadas en preservar la identidad cultural de los pueblos, sus costumbres y sus valores propios. Prueba de ello es el interés que ha despertado este tema en el ámbito de la Arquitectura y de la Ingeniería. La Arquitectura tiene actualmente entre sus especialidades varias disciplinas abocadas a la restauración, rehabilitación y reciclado de los edificios antiguos (Nina Avramidou, 1996).

Profesionales de la Ingeniería Estructural están ocupados actualmente en desarrollar nuevas técnicas para el análisis estructural de los citados edificios. Se puede citar a algunos de ellos: Giorgio Macchi (1995) ha realizado investigaciones sobre la aplicación de los métodos



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



numéricos y experimentales para la evaluación de las estructuras de edificios antiguos; Oñate E. et al (1995) se han abocado a la aplicación del Método de los Elementos Finitos para el análisis estructural de los edificios históricos.

En este contexto, muchos edificios antiguos en todo el mundo están siendo reparados, restaurados y reacondicionados para volver a ser utilizados, en una gran mayoría como centros de actividades culturales y sociales.

Algunos de los edificios históricos que se encuentran en este proceso, se destacan:

En Europa:

La Torre de Pisa, en Italia, con serios problemas de fundación, la cual viene siendo objeto de continuos estudios e intervenciones con el fin de evitar su destrucción.

La Torre Eiffel, en París - Francia, es permanentemente observada por los especialistas para poder detectar el mínimo detalle de corrosión u otro defecto que haría peligrar su supervivencia.

La Catedral de San Marcos en Venecia, Italia, en la que se han instalado numerosos sistemas que sirven para controlar la evolución de su comportamiento estructural.

En Medio Oriente y África:

La rehabilitación y preservación de las iglesias y monumentos históricos, de la ciudad de Jerusalén y de todo sitio que guarde algún vestigio de historia en sí misma.

Las Pirámides de Egipto y las Tumbas de los Faraones son en este momento fuentes de información de la dimensión que ha alcanzado el desarrollo de las ciencias en los pueblos de la Antigüedad, en este caso los egipcios y los distintos pueblos que ocuparon, o que los dominaron a través de la historia.

En América:

La revitalización de las Ruinas del Machu Pichu en el Perú, como documentos vivos de la Cultura de los Incas, Grupo Indígena que habitaba en el Altiplano de la Cordillera de los Andes. A través de estas reconstrucciones y excavaciones arqueológicas se ha podido conocer el alto nivel de conocimiento científico de este pueblo nativo.

Las construcciones Aztecas restauradas en México, ha posibilitado también conocer la historia y la cultura de este grupo indígena habitante original de Centro y Norte América.

Particularmente, en Paraguay:

Siguiendo esta política de fomentar la conservación y revalorización del Patrimonio Histórico nacional se han realizado restauraciones importantes en construcciones tales como “La Manzana de la Rivera”, construcción realizada en el siglo XIX, se conserva como una muestra de las construcciones de la época de la colonización española, con varias construcciones, diseñadas originalmente y construidas para viviendas con técnicas y materiales de la época. Entre éstas sobreviven construcciones con cerramientos realizados en adobe, pisos con ladrillos de adobe cocido, cubierta con estructura de madera y tejas cerámicas de diseño tipo españolas.

Actualmente es utilizado como centro de actividades culturales, teatro y oficinas.

Las intervenciones en las Ruinas Jesuíticas, en los departamentos de Misiones e Itapúa, las restauraciones de la Iglesia de Yaguarón, en la ciudad de Yaguarón, la Iglesia de Trinidad, en Asunción, la Estación Central del Ferrocarril, el Teatro Municipal, etc.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



### III. EXPERIENCIAS PARTICULARES DE INTERVENCIONES EN EDIFICIOS Y OBRAS DE INTERÉS HISTÓRICOS EN PARAGUAY.

#### III. I METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

En las intervenciones que hemos tenido oportunidad de participar sobre edificios históricos en el Paraguay, se ha diseñado una metodología de análisis, la cual se presenta a continuación:

##### a) Recopilación de Información

Esta primera etapa de RECOPIACION DE INFORMACIONES PREVIAS está compuesta de la recopilación de toda la documentación que se pueda obtener sobre el edificio histórico:

##### En el aspecto gráfico:

- Planos de la construcción original, si los hubieran.
- Planos de toda intervención anterior, ya sea por ampliaciones o reparaciones que se hayan realizado en el transcurso de la vida del edificio.

##### En el aspecto histórico:

- Toda la información histórica que pueda recolectarse tanto en archivos nacionales como en los entes de la Administración Pública o Privados, en cuanto a la existencia del edificio; sus administradores, propietarios, el uso del mismo, su construcción, mantenimientos realizados, etc
- La época en que fue construido y los materiales que se utilizaron.
- Quiénes fueron sus proyectistas, quiénes dirigieron la obra y quiénes lo ejecutaron.

##### b) Información Actualizada

En ésta se recopila toda la información actual acerca del edificio.

##### b.1) En el aspecto gráfico:

- Relevamiento plani-altimétrico de todo el edificio, en su conjunto y de las estructuras de madera en particular, en planta y en alzado, con todos los detalles de uniones, apoyos, etc.
- Levantamiento fotográfico del estado actual de las distintas partes del edificio y de las estructuras de madera.
- Cartografía de daños, que deberá realizarse con la rigurosidad científica que el tema exige. En anexos se adjuntan unos formatos de fichas diseñadas para su desarrollo, en el marco de nuestra experiencia.

##### b.2) En cuanto a la utilización futura del edificio:

- El Anteproyecto de la rehabilitación, en relación a los cambios que deseen realizarse en la parte constructiva, como ser demoler paredes existentes, construir otras, colocar nuevas aberturas o eliminar algunas existentes debido a la necesidad de un cambio de uso.
- Las propuestas de modificación de las fachadas actuales, ya sea para un embellecimiento recomendado por los proyectistas o en vistas a restaurar las fachadas que hayan sido las originales del Edificio en cuestión.
- El proyecto de utilización del Edificio, en forma integral así como en cada una de sus partes.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



- El proyecto de modificación de las instalaciones de servicio: Se mencionan estas modificaciones debido a que el confort que exige la vida actual hace necesario realizar nuevas instalaciones sanitarias, de alimentación de agua corriente y de desagües, de iluminación y energía eléctrica, de acondicionamiento térmico y acústico, así como toda infraestructura destinada a prevenir futuros daños, sean éstos estructurales o en parte de la edificación.
- Los posibles cambios de uso del todo o parte del Edificio, con el objetivo de determinar las cargas actuales, con lo cual se define el estado de tensiones de las partes de la estructura, se compara con la situación original y con la capacidad de soporte de los materiales constitutivos.
- La disponibilidad de fondos para llevar adelante la rehabilitación y reparaciones necesarias así como toda intervención necesaria al proyecto definido, pues de ello depende toda acción a tomar.

### c) Diseño de Experimentos

Técnicas experimentales y numéricas son esenciales para resolver problemas en Ingeniería. Con el conocimiento acabado de los modelos mecánicos, se pueden reducir el número de estudios experimentales y se aplican éstos a los métodos numéricos.

Sin embargo la fantástica eficiencia lograda hoy por los métodos numéricos es tal que uno confía en ellos con mucha autosuficiencia y esta confianza excesiva puede dar origen a serios riesgos. Este riesgo está siempre presente en cuanto al diseño de estructuras nuevas se refiere, pero el mismo se vuelve aún más evidente en el diagnóstico e intervenciones sobre construcciones históricas.

Cuando se interviene en monumentos históricos, el papel del Ingeniero debería acotarse y éste debería asumir su función con modestia, ya que el problema de la conservación del patrimonio es muy complejo e involucra consideraciones multidisciplinarias. Cuando se diseñan nuevas obras, se debe considerar que el fin de los mismos no es sólo “su resistencia”, sino sus posibles usos para cubrir necesidades humanas. De la misma manera, se debe tener en cuenta que la preservación de un monumento no puede tener como único fin el de su supervivencia.

Al reforzar una construcción histórica se arriesga a dañar su esencia, y afectarlo desfavorablemente. El problema de estabilidad de un monumento no encuentra su óptima solución en intervenciones que garanticen solamente su estabilidad; la solución debe ser el resultado de un proceso de optimización que tome en cuenta todos los componentes del monumento.

Debido a estas consideraciones, el problema es particularmente difícil y los procedimientos actuales de diseño para estructuras nuevas, así como los criterios de seguridad no se pueden aplicar estrictamente debido a que muchas veces el profesional se encuentra con materiales y tecnologías constructivas fuera de uso actualmente. Además, la modelización de las estructuras antiguas es mucho más compleja que el de las estructuras actuales debido a varios factores, como la inexistencia actual de ciertos materiales utilizados en su construcción original y al desconocimiento de los mismos y sus propiedades. Resumiendo, existe cierto riesgo de que los métodos actuales de análisis puedan dar resultados erróneos de su comportamiento. Es por esta razón que éstos deberán acompañarse de los estudios físico - mecánicos y pruebas de carga a realizarse en el sitio mismo del monumento a reforzarse.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



### c.1) Extracción de Muestras y Caracterización del Material

Un extractor de núcleos para madera, operado con las técnicas usuales, es bastante invasivo, y frecuentemente provee material insuficiente para las pruebas de laboratorio requeridas.

En el caso de las estructuras de madera, la extracción de la muestra no puede ni debe ser de un tamaño importante debido al daño que la misma puede ocasionar en la estabilidad de las piezas. Muestras pequeñas sólo son válidas para determinar algunas características físicas pero no mecánicas de las mismas.

Sin embargo, la extracción de una o más muestras pequeñas permite identificar la especie de madera en que fue construida la estructura, su estado patológico, el porcentaje de humedad actual, para definir su posible estado de equilibrio, su perspectiva en cuanto a su desempeño actual o futuro, así como definir la necesidad o no de realizar ensayos de caracterización físico – mecánicas de la misma. De acuerdo a recomendaciones de Taboada, V. (1.998), si al identificar la muestra, se define una especie conocida en el medio nacional, basta con adoptar las características físico mecánicas conocidas y utilizadas con total seguridad en el país.

En caso de que la caracterización de la especie indique que ella corresponde a una especie poco conocida en el medio nacional, o bien poco utilizada, sea por la escasez o desaparición de la misma, es necesario proceder a caracterizar sus propiedades físico mecánicas.

Por otro lado, puede ocurrir de que la cantidad de material extraído no sea suficiente para realizar todos los ensayos de caracterización requeridos. En ese caso, se acompañan con una serie de pruebas diagnósticas no destructivas, las que citaremos a continuación.

### d) Pruebas Diagnósticas No Destructivas (NDT)

Técnicas no destructivas son muy convenientes para auscultar valiosas construcciones históricas donde es imprescindible conservar la integridad de las mismas.

LAS TÉCNICAS DE TESTEADO NO DESTRUCTIVAS (NDT) para las maderas son muy diferentes de aquellas utilizadas para materiales isotrópicos y homogéneos como los metales, plásticos y cerámicas. En estos materiales, no basados en madera, sus propiedades físicas y mecánicas son controladas durante el proceso de manufactura y las NDT son utilizadas para determinar la presencia de discontinuidades, huecos o inclusiones. Sin embargo, en las piezas de madera, esas irregularidades ocurren naturalmente y además pueden ser generados por agentes degradantes que se encuentran en su entorno. Por ello, las NDT para maderas ofrecen alguna información que siempre deberá complementarse con otras.

Entre las NDT para estructuras de madera se pueden citar:

#### d.1) Flexión Estática

Permiten definir el Módulo de Elasticidad midiendo la deformación generada por esfuerzos de flexión en una pieza de madera, sin necesidad de llevarla al colapso.

#### d.2) Propagación de Ondas

Otras técnicas no destructivas utilizan la propagación de la onda de tensión. La transmisión de la velocidad del sonido y la atenuación de las ondas de esfuerzos en las maderas son utilizadas como parámetros indicativos.

Se aplican también pruebas de tomografía sónica y eléctrica para determinar la morfología del material, su homogeneidad y su humedad constitutiva.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



### e) Modelos Físicos y Matemáticos

El testeo físico en modelos de estructuras completas es hoy utilizado para compararlo con los resultados de los modelos numéricos, ya que los mismos no son plenamente satisfactorios, particularmente para el comportamiento ante cargas cíclicas y grandes esfuerzos dinámicos.

Los modelos físicos son menos competitivos que los modelos numéricos desde el punto de vista del costo y tiempo. Sin embargo existen dificultades que aún no es posible superarlas, tanto para el modelado físico como para el de los métodos numéricos, como ser la falta de conocimiento de las propiedades de los materiales utilizados en la antigüedad.

Por otro lado se debe destacar la existencia en la actualidad de innumerables herramientas informáticas que permiten un modelado numérico de las estructuras y la introducción en ellas de todas las hipótesis, existentes o no, en cuanto a las condiciones de apoyo, a las propiedades físico mecánicas de las piezas constitutivas de las estructuras, a los distintos estados de carga, sean los que hayan estado sometida la estructura a lo largo de su vida, la situación actual de la misma o de una situación supuesta de carga de acuerdo al futuro uso del edificio en estudio. Estos estudios deben ir acompañados del análisis del conjunto, pero es un aporte informativo muy útil.

En resumen, no hay modelo, sea físico o numérico, que pueda alcanzar una razonable credibilidad sin el aporte de algunos datos esenciales como las propiedades mecánicas y reológicas de los materiales: composición química, estructura física, el estado de conservación de los mismos y sus leyes constitutivas, resistencia a la compresión, a la tracción, al corte, la deformabilidad de los mismos bajo la acción de las cargas y la distribución estocástica de tales propiedades, así como la variación (determinística) dentro de la estructura, debido por ejemplo a trabajos hechos en épocas diferentes. Es por ello que necesariamente debe acompañarse de otras pruebas, que al contrario de éstas ya descritas, son pruebas destructivas del material constitutivo; sin embargo se trata de diseñar las mismas de tal modo que al realizarlas se proceda a la mínima alteración de la estructura.

### f) Revisión y Minucioso Análisis de la Información Recopilada:

Para esta etapa se debe hacer uso de toda la información obtenida en las anteriores, para globalizar todos los datos reunidos acerca de la construcción, con el fin de detectar el origen y las causas de los daños. En casi todos los casos, no existe una única causa generadora de los daños. Estos se originan por una suma de causas que propician la generación de otros.

Lo recomendable es poder abordar estos estudios minuciosamente y cuidando de no provocar mayores daños ni traumas en la situación detectada.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, para llegar a un conocimiento más profundo de los daños o de la situación real de las partes del edificio, se debe apelar a procedimientos más traumáticos de detección.

Así pues en esta etapa, se propone realizar:

- Un ordenamiento y clasificación de la información obtenida en las etapas anteriores.
- Definición de las condiciones actuales de las Estructuras de Madera, mediante:
  - a) La identificación de las patologías existentes. Luego del relevamiento patológico y la elaboración de la cartografía de daños se llegan a identificar los daños y el origen de los mismos con el objetivo de definir la solución a adoptar.





## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



- b) Caracterización Físico – Mecánica de la madera, planchuelas, bulones u otros materiales utilizada en las estructuras de madera, por medio de ensayos apropiados para cada caracterización.
- c) Inspección de los elementos de apoyo.
- d) Identificación de las cargas actuantes.
- e) Ensayos no destructivos que aportan información complementaria para diagnosticar el estado de las estructuras.

### g) Conclusiones y Recomendaciones

Al llegar a la etapa de CONCLUSIONES, es imprescindible contar con toda la recopilación de las etapas previas y establecer un orden en la prosecución de las siguientes, que se recomienda a continuación:

- Clasificación y calificación de toda información obtenida
- Análisis y definición de las probables causas del deterioro sufrido por el todo y partes de las estructuras, verificar el estado y el tipo de alteración sufrida, sus niveles de riesgo y todo lo concerniente a la seguridad.
- Cálculo de las tensiones de trabajo en la estructura bajo la acción de las cargas actuantes o previstas, relacionado además al tema de seguridad ya mencionado.
- Definir el tipo de intervención a aplicar en el edificio.
- Redacción de un informe con las conclusiones.

### h) Intervenciones sobre la Edificación

El resultado de la aplicación de la metodología es factor importante a la hora definir el tipo de uso que puede otorgársele al edificio en cuestión.

El carácter de las obras a realizarse, se definirá luego de los análisis ya mencionados y puede describirse como sigue, (González, Valcarcel S. ,Puelles (1998):

#### h.1) Conservación:

Acciones tendientes al mantenimiento de los elementos que afectan a la seguridad , higiene y estructura en la edificación.

#### h.2) Restauración:

Grado máximo de conservación, con reparaciones que tratan de ir a la reproducción de las condiciones originales de los elementos tratados.

#### h.3) Consolidación:

Refuerzo de los elementos estructurales, con sustitución parcial de alguno de ellos, sin alterar el esquema y organización del edificio.

#### h.4) Rehabilitación:

Adecuación y mejoramiento de la habitabilidad , con reorganización del espacio interior (si fuera necesario), y con mantenimiento de la estructura básica y aspecto exterior original.

#### h.5) Reestructuración:



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México



Comprende obras de adecuación del espacio interior que pueden llegar al límite del vaciado total manteniendo la fachada original, se puede llegar a admitir un aumento a volumen horizontal o vertical.

### **h.6) Renovación con Obra Nueva:**

La obra nueva debe estar de acuerdo a las normas vigentes de la construcción. Esta clasificación de acciones no es estricta, ya que puede darse el caso de una combinación de intervenciones en un edificio. La metodología desarrollada es un elemento que permite tomar la decisión de cuales acciones realizar, pero el carácter de la intervención estará definido por el organismo encargado del estudio del edificio de valor histórico.