

CONPAT 2013

01 al 04 Octubre de



CARTAGENA - COLOMBIA

XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
XIV CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

ESTRUCTURAS, MATERIALES, CONTROL DE CALIDAD PROYECTO Y OBRA, PATRIMONIO HISTORICO Y CULTURAL, NORMATIVA Y FORMACIÓN, RESPONSABILIDAD SOCIAL, NUEVO CONOCIMIENTO Y TENDENCIAS EN LA ACTIVIDAD

Comportamiento de las estructuras de madera construidas en la Estancia Jesuítica de Santa Catalina en el siglo XVII

J. L. Gómez¹, M. del C. Fernández Saiz², L. Papalardo³

^{1,2,3} Taller de Investigación de Diseño Estructural, TIDE, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de Córdoba. ¹ e-mail: ccp-cons@ciudad.com.ar ² e-mail: mfernandezsaiz@yahoo.com.ar ³ e-mail: ingpapalardo@yahoo.com.ar

RESUMEN

Se presenta en este trabajo el estudio de estas tipologías estructurales de madera utilizadas por los jesuitas en las construcciones de la Estancia de Santa Catalina, provincia de Córdoba, construcción declarada Patrimonio de la Humanidad. Se realiza la identificación macroscópica y microscópica de la madera utilizada en vigas y columnas, en la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Se realizan también los ensayos para conocer las características físicas y mecánicas en nuestro Laboratorio. Posteriormente se realiza la verificación de resistencia y deformabilidad según la norma brasilera BR7190 para conocer el grado de seguridad de la estructura. Se estudian también las estructuras reticuladas conformadas por pares, nudillo y tensor, relevando las manifestaciones patológicas en los elementos estructurales y realizando un diagnóstico que permitió estimar el grado de seguridad de los mismos y proponer actuaciones para su recuperación y mantenimiento.

En las conclusiones del trabajo, se destacan fundamentalmente la durabilidad de la madera de más de 360 años de antigüedad. Se recomiendan actuaciones para la recuperación de las piezas deterioradas, y el mantenimiento de este Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Palabras clave: Estructuras de madera, patrimonio, durabilidad

ABSTRACT

This work presents the study of the structural typologies used by the Jesuit in the constructions of the Estancia St. Catalina, in Córdoba, declared Humanity Heritage. It is carried out the macroscopic and microscopic identification of the wood used in beams and columns in the Universidad Nacional de Santiago del Estero, and the essays to know the physical and mechanical characteristics in our Laboratory. Later on it is carried out the resistance and distortion verification according with the Brazilian Norm BR7190 to know the range of safety of the structure. The cross-linked structures are studied conformed by pairs, knuckle and tensile.

In the summations of the work, based on the range of safety obtained from the structural elements, it stands fundamentally out the durability of the wood more than 360 years old. Performances are recommended for the maintenance of the Humanity's Cultural Heritage.

Keywords: Wooden Structures, patrimony, durability

Autor de contacto: M. del C. Fernández Saiz

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de las investigaciones realizadas en el Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Facultad de Arquitectura de la UNC, se presenta este trabajo con el estudio de las tipologías estructurales de madera utilizadas por los jesuitas en la construcción de la Estancia Santa Catalina, provincia de Córdoba, declarada Patrimonio de la Humanidad en el año 2000. Esta Estancia, ubicada a 20 km de la ciudad de Jesús María, comprende entre otros, la iglesia, y la residencia con sus tres patios, ver Figura 1. En las áreas destinadas al servicio y las habitaciones, la construcción, característica de la época, consiste en gruesos muros de mampostería sobre los que apoyan estructuras de madera que soportan el paquete constructivo compuesto por bovedillas, mortero de asiento y tejas. Las tipologías empleadas son columnas, vigas inclinadas y vigas reticuladas. Para su análisis, se ha realizado primero la tipificación de la madera, y luego los ensayos para conocer sus características físico-mecánicas. Una vez investigada la conformación estructural, se resolvieron las estructuras con modernos procedimientos de análisis y se procedió a la verificación seccional siguiendo los lineamientos de la Norma brasilera BR 7190, determinando su grado de seguridad.

Del estudio del comportamiento estructural de estas tipologías de más de 360 años de antigüedad, se redactan recomendaciones de actuación orientadas a su conservación y mantenimiento.



Figura 1: Vista aérea de la estancia. Ubicación de la galería Patio de los esclavos

2. INVESTIGACIÓN DE LA CONFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CUBIERTA DE LA GALERÍA DEL PATIO DE LOS ESCLAVOS



Figura 2: Vistas galería Patio de los esclavos

La investigación tuvo por objeto reconocer el sistema estructural utilizado en la conformación de la cubierta de la galería del patio de los esclavos (también denominado patio de servicio), como se indica en la Figuras 1 y 2.

2.1 Determinación de la conformación de cubierta, y análisis de cargas

Se identificaron los materiales que conforman la cubierta y sus correspondientes espesores: teja muslera (100 kg/m²), mortero de cemento (63 kg/m²), tejuela de 3cm espesor (42 kg/m²), alfajías de 8,5 x 1,5 cm (35.10 kg/m²), ver Figura 3.

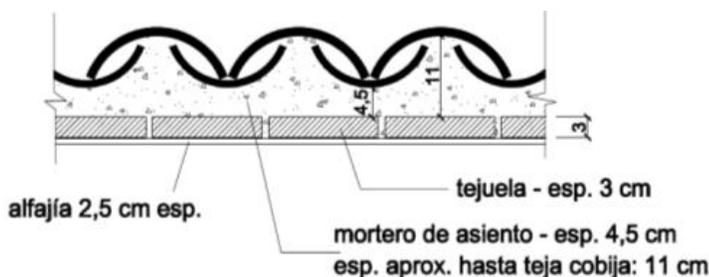


Figura 3: Detalle de cubierta

Se realizó el análisis de cargas permanentes $g = 209.80 \text{ kg/m}^2$, y variables, $p = 23 \text{ kg/m}^2$. Se determinó la carga sobre cabios: de cubierta por área de influencia (ver esquema estructural de Figura 4) más peso propio de los cabios de $12.5 \times 15 \text{ cm}$. Para el cálculo de solicitaciones se mayoraron las cargas con la combinación (1) según Norma brasilera BR 7190.

$$q_c = 1.3 \times 172.10 + 1.4 \times 16 = 246.13 \text{ kg/m} \quad (1)$$

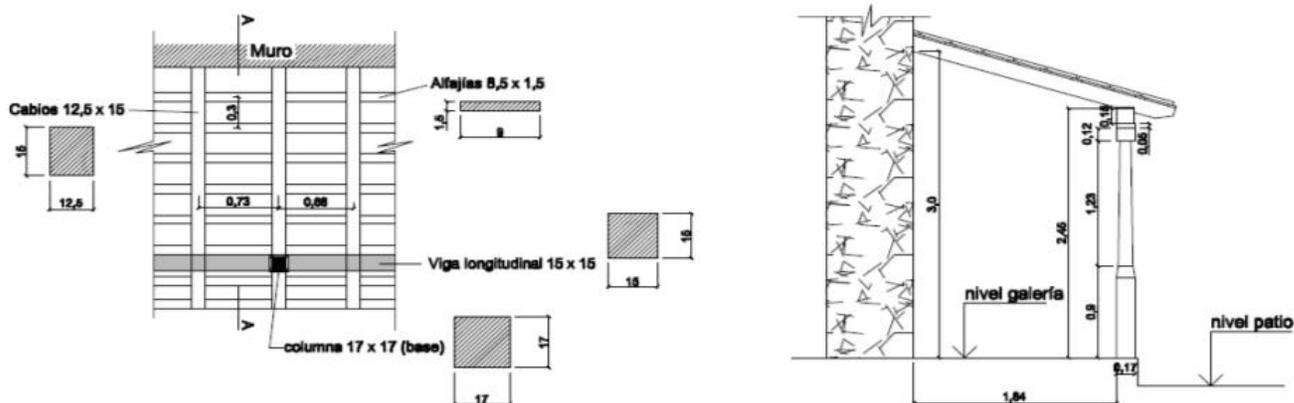


Figura 4: Planta esquemática del sector. Corte A-A

2.2 Determinación de las características físicas y mecánicas de la madera de los cabios: *Aspidosperma quebracho-blanco* (*Apocinaceae*)

Para identificar la especie de madera de los cabios, se realizó el estudio macro y microscópico de las muestras enviadas al Laboratorio de Dendrología y Xilología, INSIMA, Fac. Ciencias Forestales, U. N. de Santiago del Estero. Los resultados del Laboratorio certificaron que las piezas correspondían a la especie: quebracho blanco.

Posteriormente, se realizaron ensayos para la determinación de las características físicas y mecánicas en el laboratorio del Taller de Investigación y Diseño Estructural de la Facultad de Arquitectura: densidad = 1015 kg/m³; resistencia característica, $f_{c0k} = 454 \text{ kg/cm}^2$; resistencia de cálculo, $f_{c0d} = 145.28 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad medio, $E_m = 118322 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad efectivo (para verificación de la deformación teniendo en cuenta la fluencia lenta) (2):

$$E_{ef} = k_{mod}^1 \times k_{mod}^2 \times k_{mod}^3 \times E_m = 0.6 \times 0.8 \times 0.8 \times 118322 = 45436 \text{ kg/cm}^2 \quad (2)$$

2.3 Verificación seccional de los cabios

Para los cabios de 12.5 x 15 cm de sección y una luz entre apoyos de 2.02m, se obtienen el momento máximo: $M_{m\acute{a}x} = 125.54 \text{ kgm}$, para la verificación de la resistencia seccional (3).

$$\sigma = \frac{12554}{468.75} = 26.78 \text{ kg/cm}^2 < f_{c0d} = 145.28 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{VERIFICA} \quad (3)$$

Con la combinación de cargas (4) se calcula la flecha máxima para evaluar el estado límite de deformación (5).

$$q_c = 1 \times 172.10 + 0.2 \times 16 = 175.33 \text{ kg/m} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{5}{384} \times \frac{1.753 \times 202^4}{45436 \times 3515.63} = 0.23 \text{ cm} < \frac{202}{250} = 0.80 \text{ cm} \quad (5)$$

2.4 Determinación de las características físicas y mecánicas de la madera de columnas: Algarrobo Prosopis alba (Mimosaceae)

Se procedió de igual modo que con los cabios para identificar la especie de madera de las columnas, resultando éstas de madera de algarrobo.

Se realizaron ensayos en laboratorio para la determinación de las características físicas y mecánicas: densidad = 690 kg/m³; resistencia característica, $f_{c0k} = 379 \text{ kg/cm}^2$; resistencia de cálculo, $f_{c0d} = 103.95 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad medio, $E_m = 63667 \text{ kg/cm}^2$, módulo de elasticidad efectivo, $E_{ef} = 24448 \text{ kg/cm}^2$.

2.5 - Verificación seccional de columna

Con los datos de la geometría graficados en la Figura 5 y los datos del material, se realiza la verificación seccional para un esfuerzo normal de compresión de $N = 1374 \text{ kg}$, y una esbeltez de $\lambda = 66$, (7) - (9).

$$F_E = \frac{\pi^2 \times E_{c0ef} \times I}{L^2} \quad F_E = \frac{3.1416^2 \times 24448 \times 2380}{250^2} = 9188 \text{ kg} \quad (7)$$

$$M_d = N_d \times e_d = 1310 \times 0.99 = 1297 \text{ kg cm} \quad (8)$$

$$\sigma_M = \frac{1297}{366} = 3.54 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_N = \frac{1374}{13 \times 13} = 8.13 \text{ kg/cm}^2 \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cd}} \leq 1 \quad \frac{8.13}{103.9} + \frac{3.54}{103.9} = 0.11 \ll 1 \text{ VERIFICA} \quad (10)$$

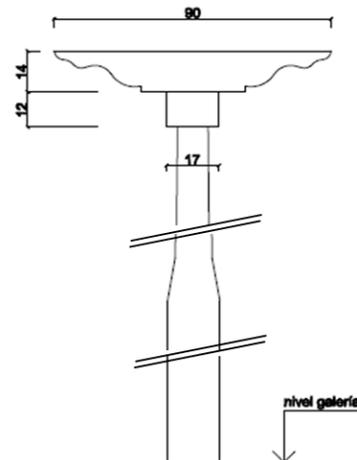


Figura 5: Detalle de columna

3. INVESTIGACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS CABRIADAS DE MADERA EN CUBIERTA DE LAS HABITACIONES DEL PATIO DE LAS HIGUERAS

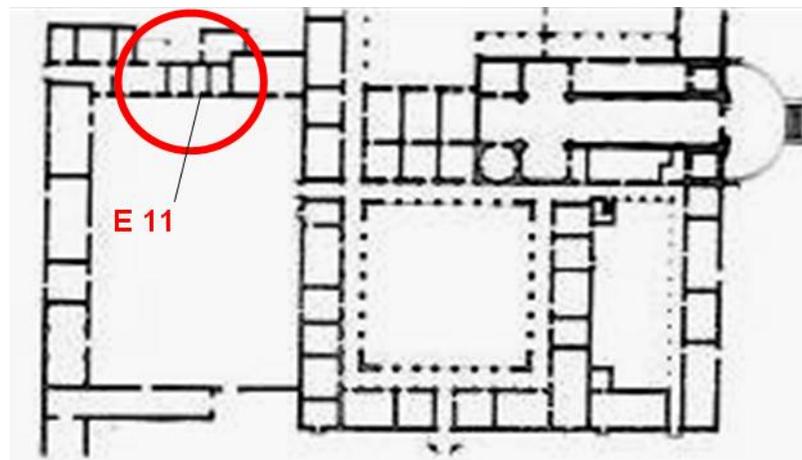


Figura 6: Habitaciones del Patio de las higueras

La estructura que se verificó corresponde a la habitación E11 ubicada en el Patio de las Higueras, como se indica en la Figura 6, y en la cual se observaron manifestaciones patológicas. Primero se procedió a relevar in situ la sala en cuestión, tanto en sus dimensiones en planta, como también la organización estructural del plano superior. Para el relevamiento en alzado se utilizaron además los datos suministrados por el equipo de topógrafos, ver Figura 7.

Esta estructura, característica de la época, está constituida por una cabriada central de madera azuelada con pares y nudillos, que se apoya sobre muros de un ancho aproximado de 0,90 mts.

Comportamiento de las estructuras de madera construidas en la Estancia Jesuítica de Santa Catalina

Se completa el mecanismo con cabios transversales colocados cada 20 cm, apoyados sobre la cabriada de madera y en los muros extremos. Éstos reciben el paquete constructivo compuesto por las bovedillas, el mortero de asiento y las tejas. Las uniones de las diferentes barras se materializan por encaسته, sin presencia de clavos u otro conector, como se aprecia en la Figura 8.

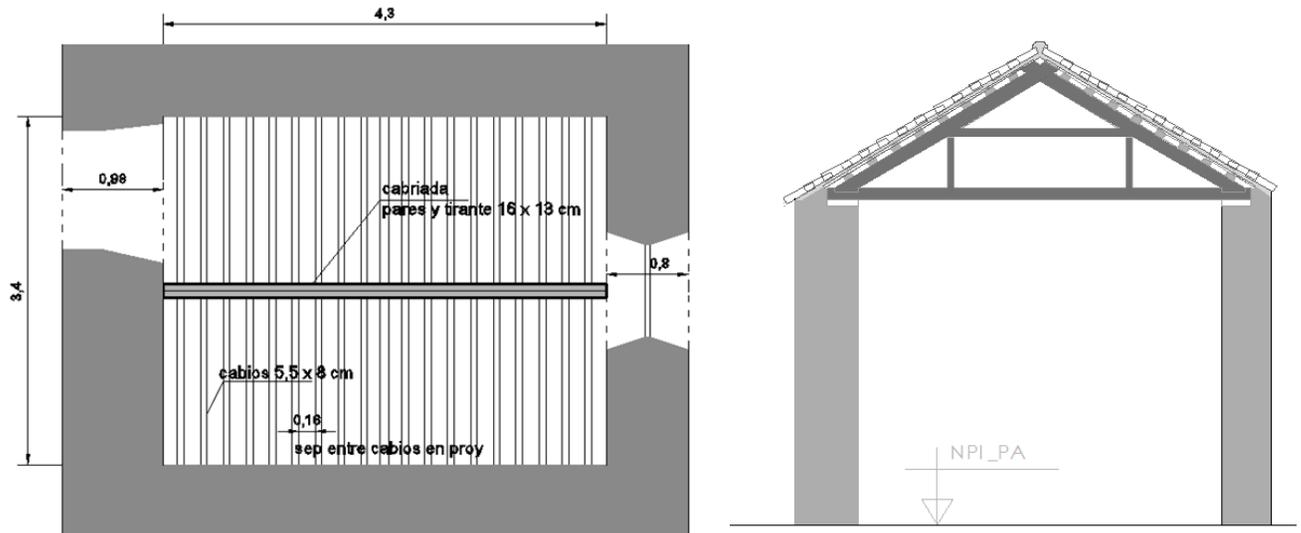


Figura 7: Organización estructural de cubierta. Corte transversal

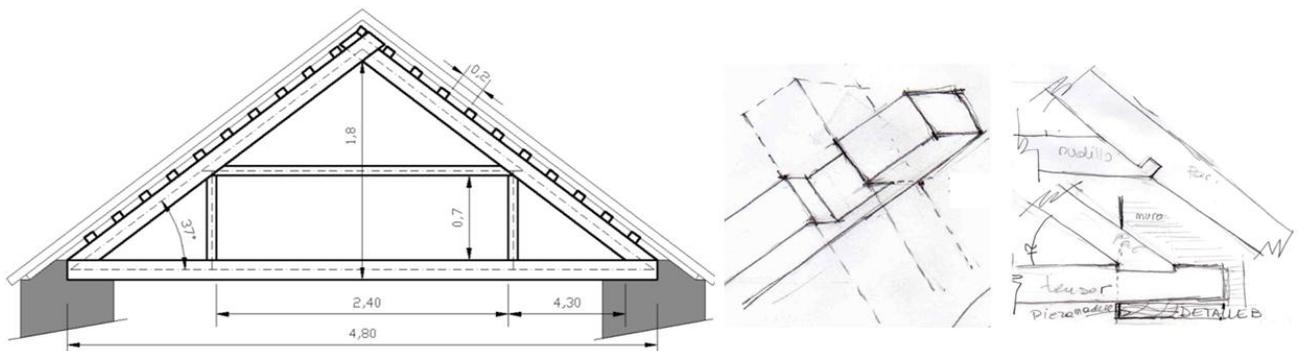


Figura 8: Corte cabriada. Detalle de unión entre pares y entre par y nudillo

Durante las tareas de relevamiento desarrolladas, se observaron importantes manifestaciones patológicas, indicadas en la Figuras 9.



Figura 9: Cabriada. Manifestaciones patológicas relevadas en pares y tirante, y en apoyos

3.1 Determinación de las características físicas y mecánicas de la madera de la cabriada: *Prosopis* sp (Algarrobo)

Del mismo modo que en los casos anteriores, se realizó el estudio macro y microscópico de una muestra para la identificación de la madera, correspondiendo a la especie: *Prosopis* sp. (ALGARROBO) con presencia de galería de insectos, ver la Figura 10.

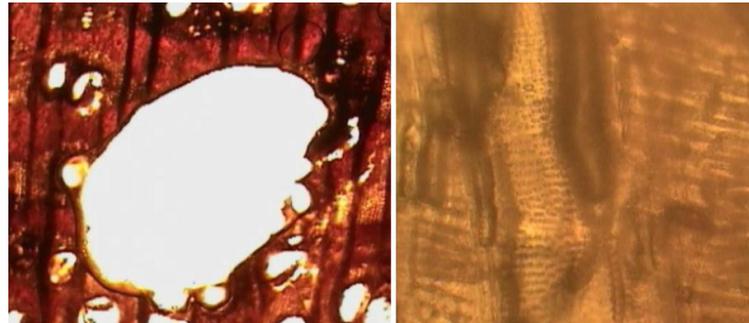


Figura 10: Muestra. Secciones transversal y tangencial. Estado de la madera de la estructura

Se realizaron ensayos en el Laboratorio y las características físico-mecánicas de la madera obtenidas son: densidad = 690 kg/m^3 ; resistencia característica: $f_{c0k} = 379 \text{ kg/cm}^2$; resistencia de cálculo: $f_{c0d} = 103.95 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad medio, $E_m = 63667 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad efectivo, $E_{ef} = 24448.128 \text{ kg/cm}^2$.

3.2 Características de la Cubierta de techo sobre la cabriada y análisis de cargas

La imposibilidad de realizar un análisis invasivo, ha obstaculizado la determinación fehaciente de la constitución material de la cubierta, en los aspectos que no estaban a la vista. Se ha supuesto, entonces, su conformación y las características físicas y mecánicas de los materiales componentes, en base a antecedentes de estudios que se realizaron en otras construcciones similares contemporáneas a la estancia, como la Estancia de Alta Gracia, y el Museo de Jesús María. En base a esos estudios y a los relevamientos de campo y planialtimétrico, se determinaron los espesores de cada uno de los materiales constitutivos, tarea que permitió cuantificar la carga por metro cuadrado. La cubierta es de similares características que la de la galería del Patio de los Esclavos: conformada por bovedillas de $18 \text{ cm} \times 28 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ de alto, asentadas sobre los cabios, y sobre ellos se encuentran colocadas tejas españolas con una argamasa de $4,5 \text{ cm}$ de espesor, utilizada como mortero de asiento.

Tabla 1 : Propiedades de las barras

N° de barra	b (cm)	h (cm)	MATERIAL			
				Peso Específico (kg/m^3)	E_m (kg/m^3)	E_{ef} (kg/m^3)
1 (mampostería)	98	60	mampostería	1300	1600	-----
6 (mampostería)	80	60				
2 - 3 - 4 - 5 (pares)	13.5	16	algarrobo	690	63667	24448.1
7 - 8 - 9 (nudillo)	15	7.5				
10 - 11 (montantes)	15	7.5				
12 - 13 - 14 (tirante)	13.5	16				

Una vez estudiada la conformación y geometría de la cubierta, se realiza el análisis de cargas sobre la misma. Las cargas sobre la cabriada resultan: cargas permanentes $g = 382.48 \text{ kg/m}$ y

Comportamiento de las estructuras de madera construidas en la Estancia Jesuítica de Santa Catalina

cargas variables $p = 40.48 \text{ kg/m}$. Para el cálculo de las solicitaciones y de la deformabilidad de la estructura, con los datos ya obtenidos se utilizó el software Strap, ver Tabla 1 y Figura 11.

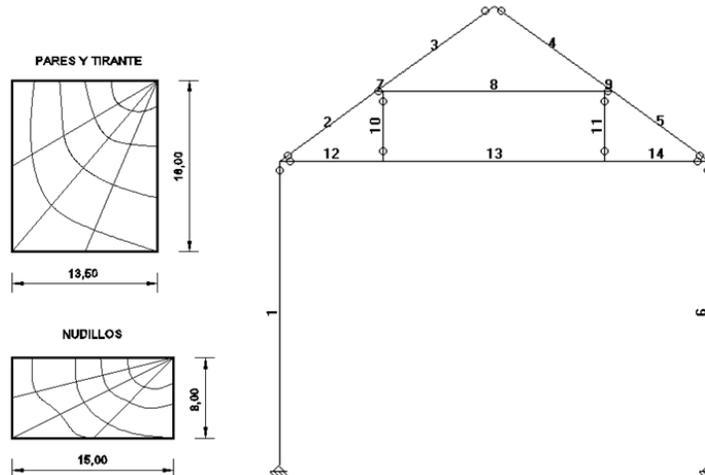


Figura 11: Secciones de barras. Geometría de la cabriada

3.3 - Combinaciones de cargas (según lo establecen las Normas Brasileiras BR7190)

Para cálculo de las solicitaciones y verificación de la resistencia se utilizó la combinación (11) y para verificar la deformabilidad se adoptó la combinación (12).

$$q_1 = 1.3 g + 1.4 p = 1.3 \times 382.48 \text{ kg/m} + 1.4 \times 40.48 \text{ kg/m} = 553.89 \text{ kg/m} \quad (11)$$

$$q_2 = 1 g + 0.2 p = 1 \times 382.48 \text{ kg/m} + 0.2 \times 40.48 \text{ kg/m} = 390.57 \text{ kg/m} \quad (12)$$

3.4 Resultados obtenidos con software Strap (Figuras 12 y 13, y Tabla 3)

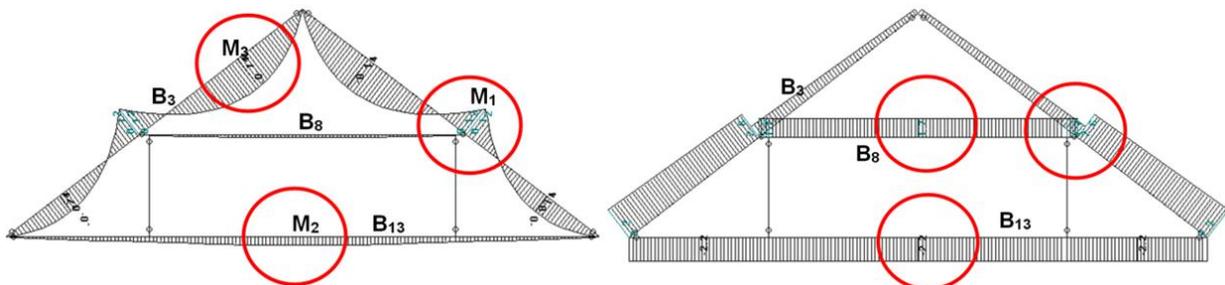


Figura 12: Diagramas de momentos flectores y de esfuerzos normales

Tabla 3: Máximas solicitaciones en barras

Nº de barra	Denominación	Momento Flector	Esfuerzo de Tracción	Esfuerzo de Compresión
13	tirante	3200 kgcm	2183 kg	-----
8	nudillo	1100 kgcm	-----	1700 kg
3	pares	13600 kgcm	-----	838 kg

3.5 Verificación seccional de los pares - barra 3

La esbeltez es $\lambda = 10.94 < 40$, entonces se verifica como pieza corta (13).

$$\sigma = \frac{838}{216} + \frac{13600}{576} = 28.18 \text{ kg/cm}^2 < 103.95 \text{ kg/cm}^2 \text{ VERIFICA (13)}$$

3.6 Verificación seccional del tirante - barra 13 (14)

$$\sigma = \frac{2183}{216} + \frac{3200}{576} = 15.67 \text{ kg/cm}^2 < 103.95 \text{ kg/cm}^2 \text{ VERIFICA (14)}$$

3.7 Verificación seccional del nudillo - barra 8

Como la esbeltez de la pieza es $\lambda = 114 > 80$, se verifica como pieza esbelta (15) - (22).

Según las NBR 7190, se calcula la excentricidad accidental mínima y excentricidad inicial (15); la carga crítica (16); la excentricidad complementaria debido a la fluencia lenta de la madera (17) - (18), y la excentricidad efectiva de primer orden (19):

$$e_a = \frac{246}{300} = 0.82 \text{ cm} \quad e_i = \frac{1100}{1700} = 0.65 \text{ cm} \quad e_{ig} = \frac{M_{gd}}{N_{gd}} = \frac{1100}{1630} = 0.674 \text{ cm} \quad (15)$$

$$F_E = \frac{\pi^2 \times E_c \theta_{ef} \times I}{L^2} \quad F_E = \frac{3.1416^2 \times 24448 \times 527.34}{246^2} = 2102 \text{ kg} \quad (16)$$

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \left\{ \text{Exp} \left[\frac{\Phi [N_{gk} + (\Psi_1 + \Psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\Psi_1 + \Psi_2) N_{qk}]} \right] - 1 \right\} \quad (17)$$

$$e_c = (0.674 + 0.82) \left\{ 2.71 \left[\frac{0.8 [1250 + (0.3 + 0.2) 70]}{2102 - [1250 + (0.3 + 0.2) 70]} \right] - 1 \right\} = 3.752 \text{ cm} \quad (18)$$

$$e_{1ef} = e_i + e_a + e_c = 0.65 + 0.82 + 3.75 = 5.22 \text{ cm} \quad (19)$$

$$M_d = N_d \times e_{1ef} \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad M_d = N_d \times e_{1ef} \left(\frac{2102}{2102 - 1700} \right) = 46400 \text{ kgcm} \quad (20)$$

$$\sigma_M = \frac{46400}{140.6} = 330 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_N = \frac{1700}{112.5} = 15.11 \text{ kg/cm}^2 \quad (21)$$

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0d}} \leq 1 \quad \frac{15.11}{103.9} + \frac{330}{103.9} = 3.33 \gg 1 \quad \text{NO VERIFICA} \quad (22)$$

3.8 Verificación del estado límite de deformación

La flecha máxima de cálculo obtenida de Strap (Figura 13): $\alpha = 0.303 \text{ cm}$ es $<$ que $l/250 = 0.96 \text{ cm}$. Dada la irregularidad del tensor, la medición del descenso realizada en obra arrojó un valor aproximado de 1 cm . Surge entonces que la flecha máxima de cálculo $\alpha : 0.303 \text{ cm} <$ flecha máxima relevada $f = 1 \text{ cm}$.

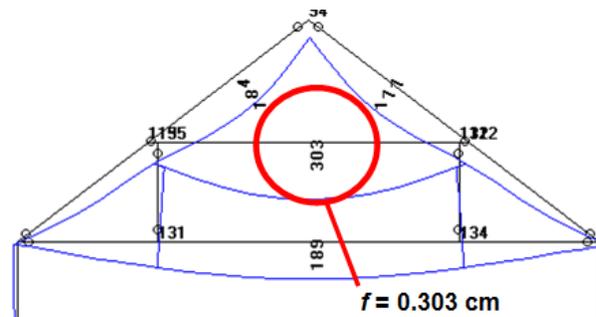


Figura 13: Descensos Máximos

4. CONCLUSIONES

Las deformaciones detectadas en la obra superan en algunos casos las consideradas admisibles; eso se puede atribuir a una disminución de la sección neta de las barras por la formación de galerías producidas por insectos, detectadas en el estudio microscópico. La verificación de todos los elementos estructurales analizados en el presente trabajo se ha realizado considerando las secciones netas relevadas sin disminución por defectos en la madera, producidos a través de su vida útil.

En la cabriada analizada se puede observar que las tensiones de compresión en nudillo, considerando la estabilidad al pandeo son superiores a las resistencias de cálculo. Se sugiere entonces, como medida de seguridad, el agregado de una nueva barra que disminuya la longitud de pandeo del nudillo, pero conservando la pieza original.

Con respecto a las galerías de insectos, que debilitan la madera y facilitan su putrefacción, se propone en primer lugar realizar las reparaciones necesarias para restituir la sección original de las piezas de madera. Se aconsejan también acciones para impedir el aumento de contenido de humedad de la madera, y luego aplicar insecticidas líquidos en los muros en lugares donde estén en contacto con las vigas, y luego realizar el tratamiento de la madera original utilizando un insecticida fungicida específico.

Como conclusión del trabajo se puede considerar que en general el comportamiento de la estructura ha sido satisfactorio sobre todo considerando una antigüedad cercana a los 360 años y una marcada falta de mantenimiento en períodos prolongados.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Consejo de Administración de la Estancia Jesuítica Santa Catalina, en la persona de su administrador, Arq. Daniel M. de la Torre.

6. BIBLIOGRAFÍA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7190 – *Projeto de estruturas de madeira*. (Río de Janeiro. 1997).

José Luis Gomez: *Estructuras de madera* (Edit. Ingreso, Córdoba, 2000).

R. Argüelles Alvarez y F. Arriaga Martitegui: *Estructuras de madera - Diseño y cálculo*.