

DURABILIDAD Y DEFORMABILIDAD DE VIGAS DE MADERA CONSTRUIDAS EN EL MUSEO JESUÍTICO NACIONAL DE JESÚS MARIA – SIGLO XVII

José Luis Gómez¹
Ingeniero Civil

Prof. Titular. Director del Taller de Investigación y Diseño Estructural (TIDE)

María del Carmen Fernández Saiz¹
Arquitecta

Prof. Adjunta. Investigadora Taller de Investigación y Diseño Estructural (TIDE)

Liliana Molinari¹
Arquitecta

Prof. Asistente Cátedra Estructuras Ib

¹Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño. Universidad Nacional de Córdoba.

Resumen.

En el marco de la investigación que se realiza en el Museo Jesuítico Nacional de Jesús María, por parte del Taller de Investigación de Diseño Estructural, de la Facultad de Arquitectura (U.N.C.), se destaca en primer lugar el comportamiento estructural del particular entrepiso de la Galería del Museo. El mismo, antiguamente llamado “Forjado de entrevigado cuajado”, está conformado por vigas de madera apoyándose entre ellas, pequeños arcos de caña del lugar y yeso.

Se realiza la identificación macroscópica y microscópica de la madera en la Universidad Nacional de Santiago del Estero y los ensayos para conocer las características físico mecánicas de la misma, en nuestro laboratorio. Posteriormente se realiza la verificación de resistencia y deformabilidad según los lineamientos de la Norma Brasileña NBR 7190 para conocer el grado de seguridad del entrepiso.

Con igual procedimiento, en la estructura del techo de planta alta, se estudia el comportamiento de las vigas reticuladas conformadas por pares y nudillo, conformación característica de la época, y las vigas principales del techo de las galerías. En cada caso después de la identificación de la madera y verificación de resistencia y deformabilidad, se concluye que al no haber uniones mecánicas las deformaciones obtenidas en la resolución por métodos computacionales coinciden prácticamente con las medidas en obra.

En las conclusiones del trabajo, basados en el grado de seguridad obtenido de los elementos estructurales analizados, se destaca en primer lugar, la durabilidad de la madera utilizada en esta obra de más de 300 años; como así también la influencia que tienen las uniones en las diferencias de las deformaciones calculadas en las vigas reticuladas, con las medidas en obra.

Se finaliza recomendando actuaciones para el mantenimiento de este Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Introducción

El presente trabajo surge de una intervención a realizarse en el Museo Jesuítico Nacional de Jesús María, a solicitud de la Dirección Nacional de Arquitectura.

El Museo Jesuítico San Isidro Labrador (1618), se encuentra en la ciudad de Jesús María, que está ubicada en el centro-norte de la provincia de Córdoba (Argentina), a 50 km de la Capital provincial, con la que se vincula por la Ruta Nacional N° 9.

El conjunto incluye además del Museo, la iglesia, la residencia y la bodega, los restos de los antiguos molinos, el perchel y el tajamar. (Fig. 1).

Integra, junto con la Manzana Jesuítica en la ciudad de Córdoba y las Estancias de Caroya (1616), Santa Catalina (1622), Alta Gracia (1643) y La Candelaria (1683), el Camino Real de las Estancias Jesuíticas. Reconociendo sus valores patrimoniales únicos asociados a los testimonios jesuíticos en Córdoba, la UNESCO los ha inscripto en la Lista de Patrimonio de la Humanidad en el año 2000.



Fig. 1. Vista del conjunto

Estudio y Verificación de la Conformación de las Estructuras de Madera.

Investigación de la conformación del entrepiso de la galería del museo.

Con el objeto de reconocer el sistema estructural utilizado en la conformación del entrepiso de la galería oeste, (Figs. 2, 3 y 4), y poder valorar la carga que está soportando, se realizó una calicata desde el nivel superior hacia el inferior, con lo cual se pudo determinar el esquema resistente y los elementos de sobrecarga permanente, (Fig. 5).



Fig. 2. Vista de la Galería Oeste.



Figs. 3 y 4. Entramado horizontal (Forjado de entrevigado cuajado).

Se verifica en CEQUIMAP (Ciencias Químicas de la U.N.C.) la composición e identificación de compuestos por difracción de Rayos X, del material blanco que se extrajo de las bóvedas de caña, del cual se han identificado las siguientes fases: yeso y cuarzo.

La fase yeso es mayoritaria, llegando casi al 100%, según informe.



Fig.5. Calicata realizada en el nivel superior de la galería

El entrepiso tiene 35 cm de espesor total, y está conformado por una estructura de viguetas de madera de quebracho blanco, de 16 x 18.5 cm, separadas cada 52 cm, sobre las que apoyan bóvedas de caña, (Fig. 6).

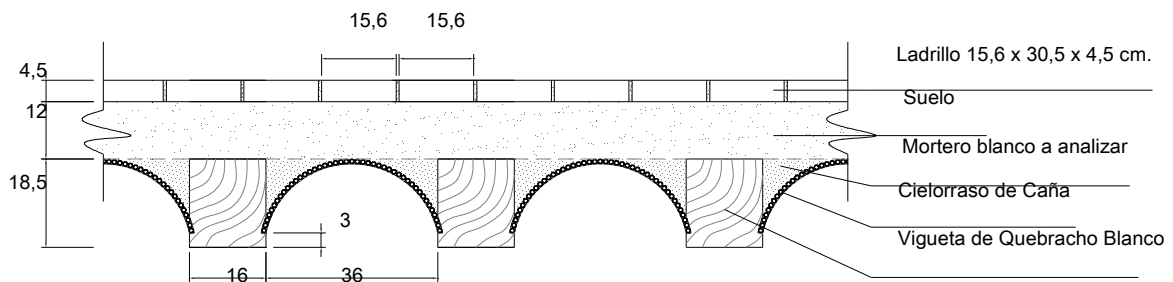


Fig. 6. Esquema de la organización estructural del entrepiso

Se realiza el análisis de cargas sobre las vigas de madera:

Ladrillo: $(0.045 \times 0.52 \times 1.0 \times 1400)$ _____ 32.76 Kg/m

Suelo: $(0.12 \times 0.52 \times 1.0 \times 1300)$ _____ 81.12 Kg/m

Mortero: $\left(\frac{0.15 \times 0.18}{2} \times 2 \times 1.0 \times 1300\right)$ _____ 35.10 Kg/m

$g = 148.98 \text{ Kg/m}$

$p = 200 \text{ Kg/m}^2 \times 0.52 \text{ m}$ $p = 104.00 \text{ Kg/m}$

$q = 1.3 \times 148.98 + 1.4 \times 104 = 339.27 \text{ Kg/m}$



Fig. 7. Medición de flechas de las vigas de madera

- Características físicas y mecánicas del Quebracho Blanco

Para identificar la especie de madera de las vigas, se realizó el estudio macro y microscópico de una muestra enviada al efecto al Laboratorio de Dendrología y

Xilología, INSIMA, Fac. Ciencias Forestales, U. N. de Santiago del Estero. Ver informe anexo.

Con el dato fehaciente del Laboratorio de que se trataba de la madera quebracho blanco, se realizaron ensayos para la determinación de las características físicas y mecánicas en el laboratorio del Taller de Investigación y Diseño Estructural, FAUDI, UNC.

$$\text{Densidad} = 1015 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Resistencia Característica} \quad f_{c0k} = 454 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Resistencia de Cálculo} \quad f_{c0d} = 145.28 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de Elasticidad} = 118322 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de Elasticidad Efectivo} = 0.6 \times 0.8 \times 0.8 \times 118322$$

$$E_{ef} = 45436 \text{ Kg/cm}^2$$

- Verificación seccional:

$$M_{\text{máx.}} = \frac{339.27 \times 3.2^2}{8} = 434.27 \text{ Kgm}$$

$$\sigma = \frac{43427}{912.66} = 47.58 \text{ Kg/cm}^2 < f_{c0d} = 145.28 \text{ Kg/cm}^2 \text{ VERIFICA}$$

- Verificación de deformación máxima:

$$q = 148.98 + 0.2 \times 104 = 169.78 \text{ Kg/m}$$

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{1.70 \times 320^4}{45436 \times 8442.17} = 0.61 \text{ cm} < \frac{320}{250} = 1.28 \text{ cm}$$

Flecha real relevada: 2.0 cm. > 1.28 cm.

$$a = \frac{5}{384} \times \frac{3.393 \times 320^4}{45436 \times 8442.17} = 1.21 \text{ cm} < \frac{320}{250} = 1.28 \text{ cm}$$

Flecha real relevada: 2.0 cm. > 1.28 cm (Fig. 7).



Fig. 8. Galería Oeste en Planta Alta - Estructura de Cubierta sobre Galería Oeste en planta alta (lateral de iglesia)

Se realizó el estudio macro y microscópico de una muestra enviada para la identificación de la madera, elaborado por el Laboratorio de Dendrología y Xililogía , INSIMA, Fac. de Ciencia Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, obteniéndose el siguiente resultado:

Especie: Prosopis sp. (ALGARROBO) con presencia de galería de insectos.

Se realizaron ensayos en el Laboratorio del Taller de Investigación y Diseño Estructural, de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Córdoba para conocer las características físico-mecánicas de la madera:

$$\text{Densidad} = 690 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Módulo de Elasticidad Medio} \quad E_m = 63667 \text{ kg/cm}^2$$

Módulo de Elasticidad Efectivo (para verificación de la deformación teniendo en cuenta la fluencia lenta):

$$E_{ef} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \times E_m$$

$$E_{ef} = 0.6 \times 0.8 \times 0.8 \times 63667 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{ef} = 24448.128 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Resistencia característica: } f_{c0k} = 379 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Resistencia de cálculo : } f_{c0d} = \frac{0,60 \times 0,8 \times 0,8 \times 379 \text{ kg/cm}^2}{1.4}$$

$$f_{c0d} = 103.95 \text{ kg/cm}^2$$

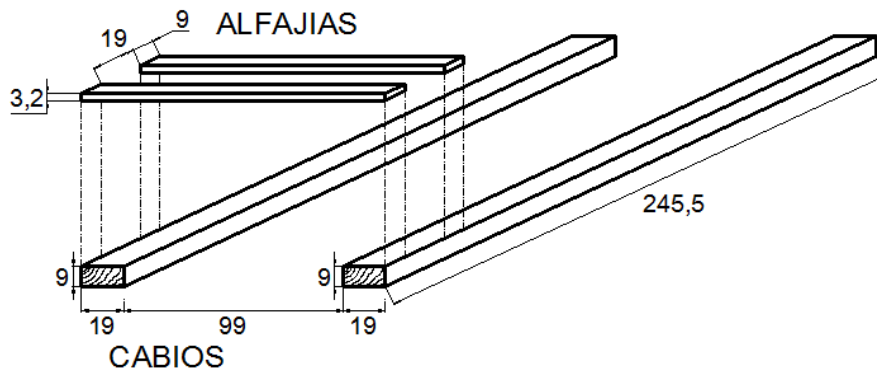


Fig. 9 Conformación de Cubierta

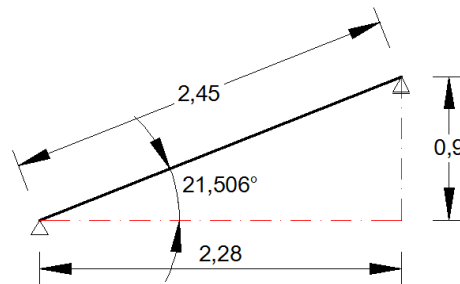


Fig. 10. Geometría de la Viga

Una vez estudiada la conformación y geometría de la cubierta, se realiza el análisis de cargas sobre la misma. (Figs. 9 y 10).

- Acción sobre Cabios:

$$q = 1.3 \times 253.87 + 1.4 \times 35.4 = 379.59 \text{ Kg/m}$$

$$q_{\text{proy.}} = \frac{379.59}{\cos 21.5^\circ} = 408 \text{ Kg/m}$$

- Solicitaciones:

$$M_{\text{máx.}} = \frac{408 \times 2.49^2}{8} = 316.20 \text{ Kgm}$$

$$W = \frac{19 \times 9^2}{6} = 256.50 \text{ cm}^3$$

$$J = \frac{19 \times 9^3}{12} = 1159 \text{ cm}^4$$

$$\sigma = \frac{31620}{256.5} = 123.27 \text{ Kg/cm}^2 > f_{c0d} = 103.95 \text{ Kg/cm}^2$$

- Cálculo de deformación máxima:

$$q = 253.87 + 0.2 \times 35.4 = 260.95 \text{ Kg/m}$$

$$q_{\text{proy}} = \frac{260.95}{\cos 21.5^\circ} = 280.46 \text{ Kg/m}$$

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{280.46 \times 2.49 \times 249^3}{30560 \times 1159} = 3.96 \text{ cm}$$

Flecha medida en obra: $f = 2.3 \text{ cm} < f \text{ de cálculo} = 3.96 \text{ cm}$

Flecha admisible: $f_{\text{adm.}} = \frac{249}{200} = 1.25 \text{ cm} < f_{\text{medida en obra}} = 2.3 \text{ cm}$



Fig. 11. Estructura de Cubierta sobre Galería Sur en planta alta (lateral de iglesia)

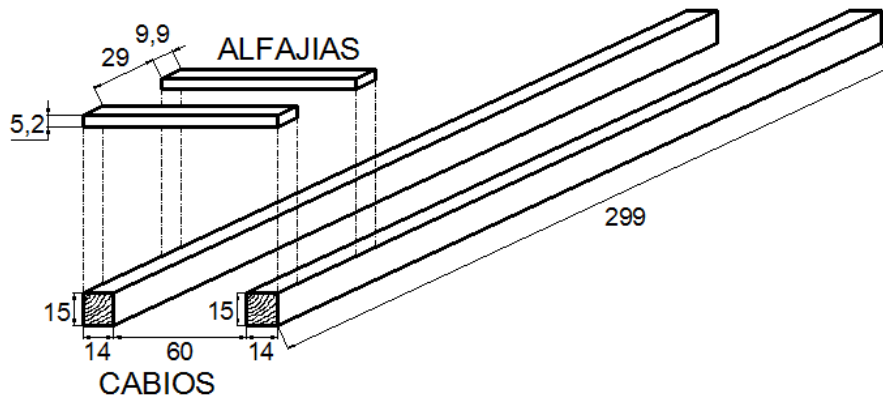


Fig. 12. Conformación de Cubierta

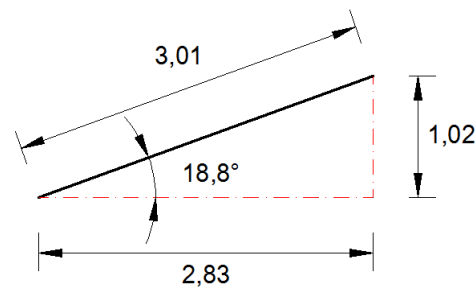


Fig 13. Geometría de la Viga

Una vez estudiada la conformación y geometría de la cubierta, se realiza el análisis de cargas sobre la misma. (Figs. 12 y 13).

- Acción sobre Cabios:

$$q = 1.3 \times 165.37 + 1.4 \times 22 = 245.78 \text{ Kg/m}$$

$$q_{\text{proy.}} = \frac{245.78}{\cos 18.8^\circ} = 259.63 \text{ Kg/m}$$

- Solicitaciones:

$$M_{\text{máx.}} = \frac{259.63 \times 3.03^2}{8} = 279.95 \text{ Kgm}$$

$$W = \frac{14 \times 15^2}{6} = 525 \text{ cm}^3 \quad J = \frac{14 \times 15^3}{12} = 3937 \text{ cm}^4$$

$$\sigma = \frac{29795}{525} = 56.75 \text{ Kg/cm}^2 < f_{\text{cod}} = 103.95 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{VERIFICA}$$

- Cálculo de deformación máxima:

$$q = 165.37 + 0.2 \times 22 = 169.77 \text{ Kg/m}$$

$$q_{\text{proy.}} = \frac{169.77}{\cos 18.8^\circ} = 179.33 \text{ Kg/m}$$

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{179.33 \times 3.03 \times 303^3}{30560 \times 3937} = 1.63 \text{ cm}$$

Flecha medida en obra: $f = 1.8 \text{ cm} > f \text{ de cálculo} = 1.63 \text{ cm}$

Flecha admisible: $f_{\text{adm.}} = \frac{303}{200} = 1.51 \text{ cm} < f_{\text{medida en obra}} = 1.8 \text{ cm}$

Cabriada de la Cocina de Planta Alta

La estructura que se verificó corresponde al plano superior de la sala ubicada en planta alta cuyo destino original era la cocina y que data de la construcción del museo no habiéndose realizado intervención alguna en dicha estructura (Figs. 14, 15 y 16).



Figs. 14 y 15. Cabriada de cocina

La estructura del techo de la sala está conformado por tres vigas reticuladas de madera azuelada conformadas por pares y nudillo, conformación ésta característica de la época (Fig. 14 y 15).

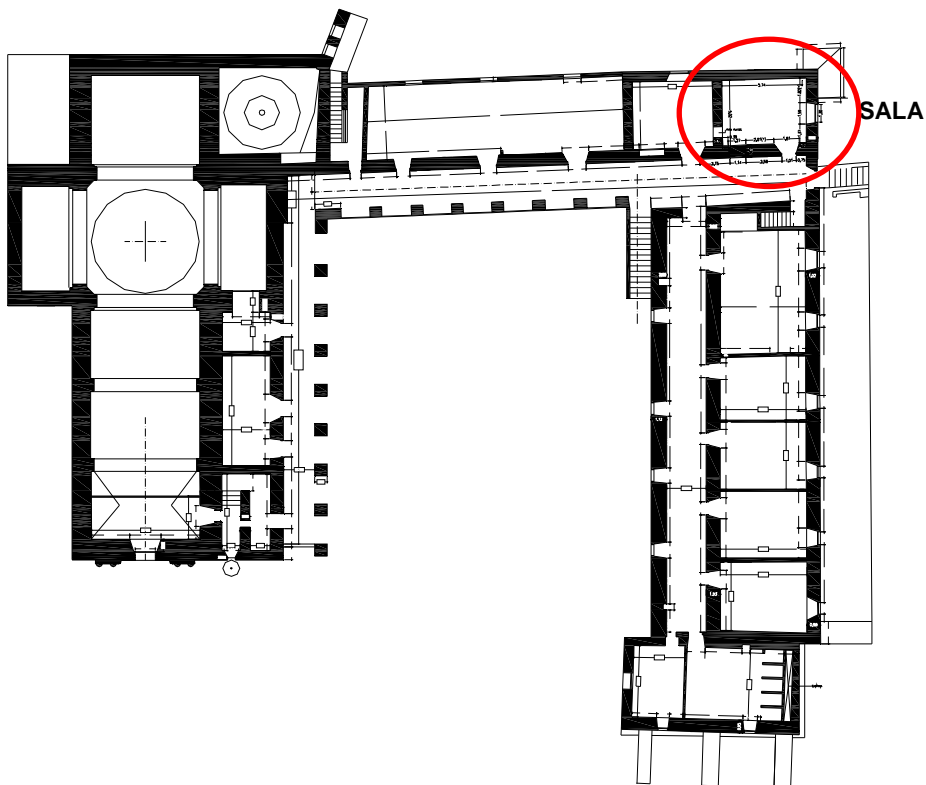


Fig 16. Planta Alta del Museo y ubicación de la Sala

Como primera medida se procedió a relevar in situ la sala en cuestión, tanto en sus dimensiones en planta, como así también la organización estructural del plano superior. Para el relevamiento en alzado se utilizaron además los datos suministrados por el equipo de topógrafos.(Figs 17 y 18).

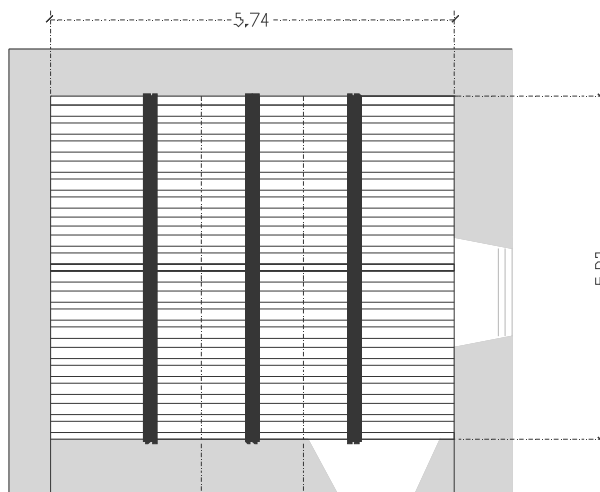


Fig. 17. Organización Estructural del Techo de la Sala

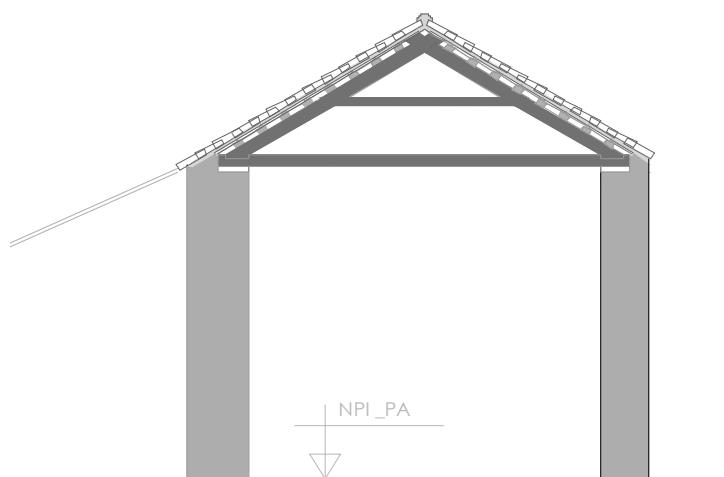


Fig. 18. Corte Transversal de la Sala

Las uniones de las diferentes barras es por encastre sin la presencia de clavos ni otro elemento (Figs. 19, 20 y 21).

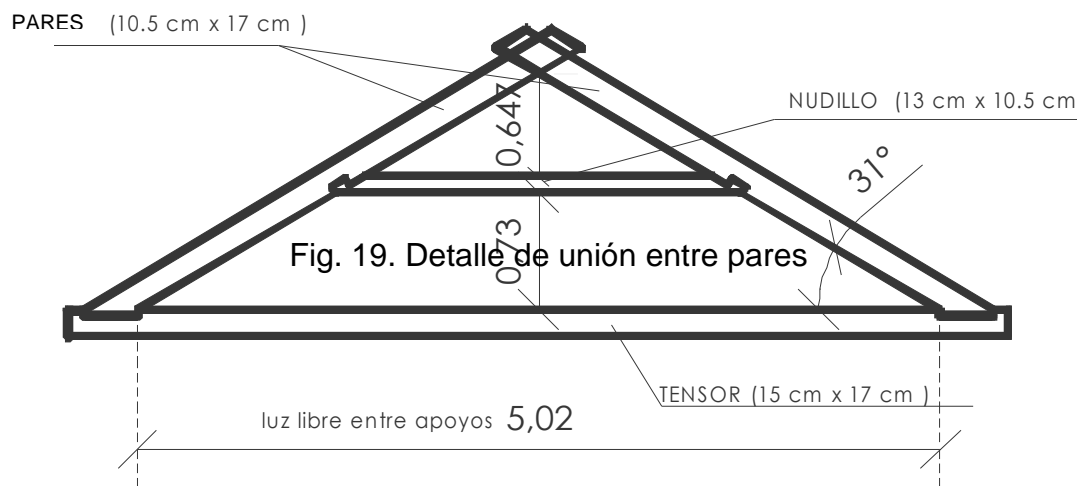
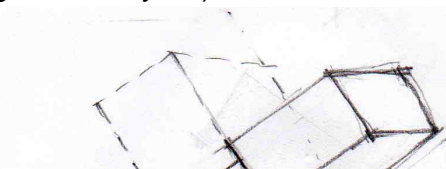


Fig. 20. Dimensiones cabriada, par y nudillo

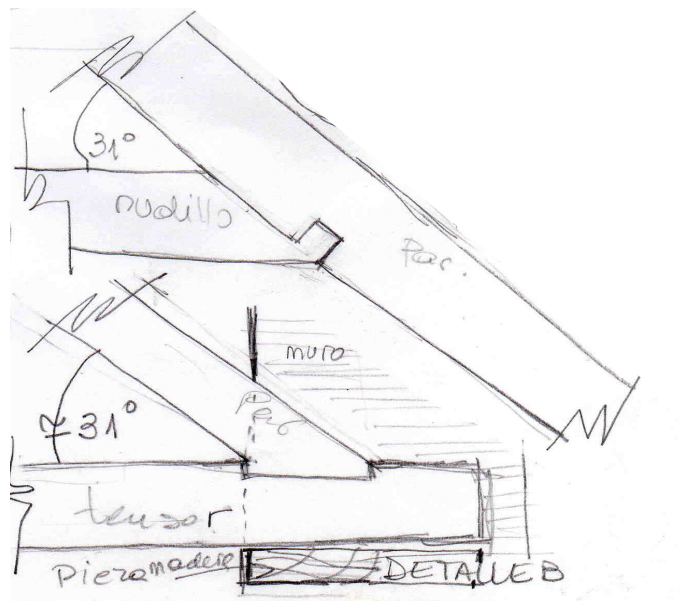


Fig. 21. Detalle de la union



entre el par y el nudillo

- Características de la

Madera de la cabriada

Se realizó el estudio de una muestra enviada la madera (peritaje Técnico por el Laboratorio de INSIMA, Fac. De Ciencia Universidad Nacional de obteniéndose los siguientes

macro y microscópico para la identificación de en Anexo, elaborado Dendrología y Xililogía, Forestales de la Santiago del Estero) resultados:

Especie: Prosopis presencia de galería de insectos. (Fig. 22)

sp. (ALGARROBO) con

Fig. 22. Estado de la madera de la estructura

Se realizaron ensayos en el Laboratorio del Taller de Investigación y Diseño Estructural, de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Córdoba para conocer las características físico-mecánicas de la madera:

Densidad = 690 kg/m^3

Módulo de Elasticidad Medio $E_m = 63667 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de Elasticidad Efectivo (para verificación de la deformación teniendo en cuenta la fluencia lenta):

$$E_{ef} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \times E_m$$

$$E_{ef} = 0.6 \times 0.8 \times 0.8 \times 63667 \text{ kg/cm}^2$$

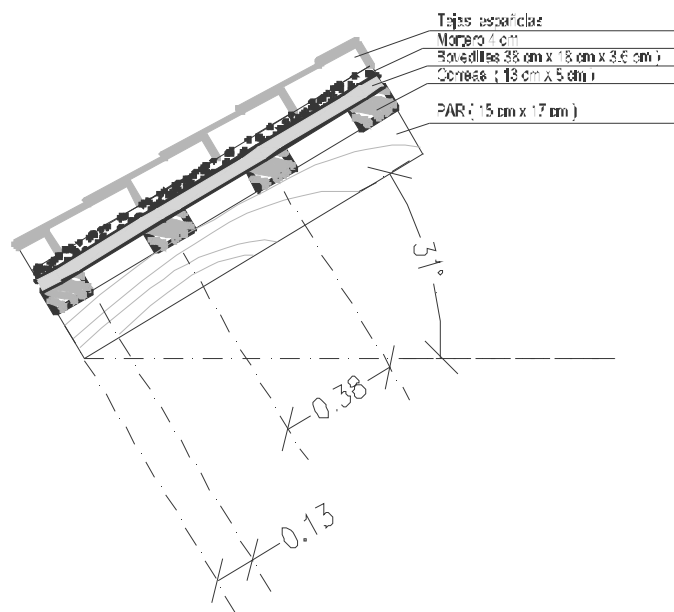
$$E_{ef} = 24448.128$$

Resistencia característica: kg/cm^2

Resistencia de $f_{c0d} = \frac{0.60 \times 0.80}{379 \text{ kg/cm}^2}$

$$f_{c0d} = 103.95 \text{ kg/cm}^2$$

- Características Cubierta de techo sobre la cabriada:



$$\text{kg/cm}^2 =$$

$$f_{c0k} = 379$$

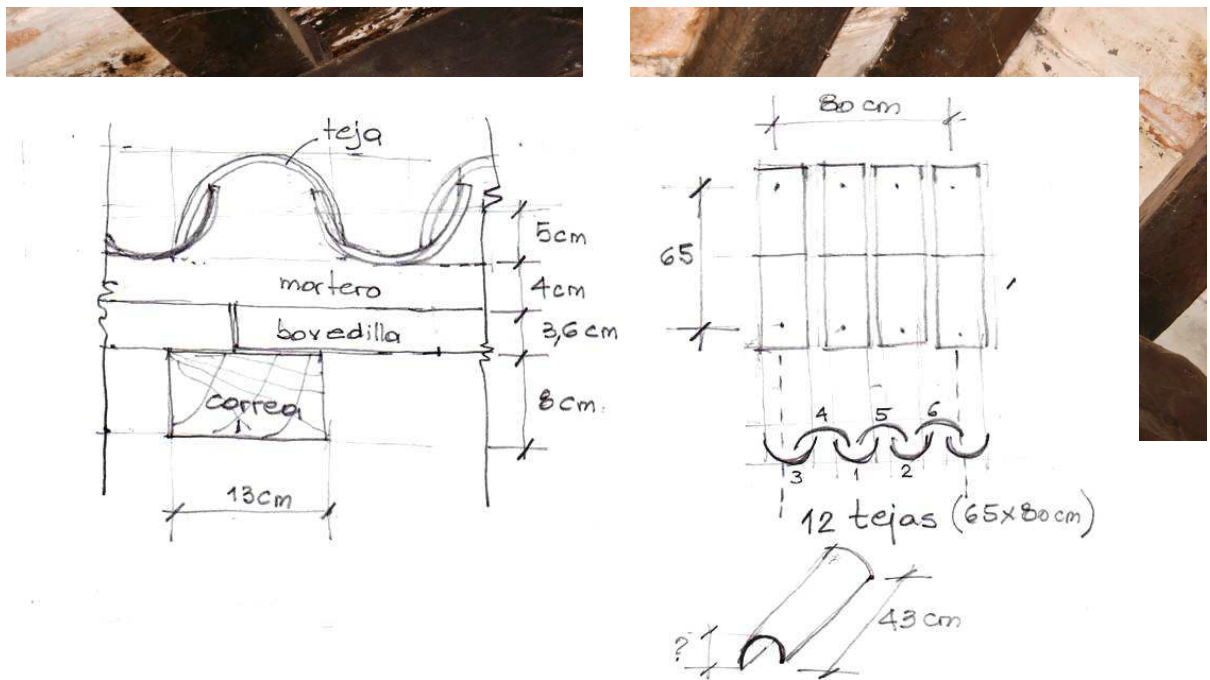
cálculo : $\frac{x \cdot 0.80 \cdot x}{1.4}$

$$1.4$$

de la

Por otra parte se realizaron exploraciones en la cubierta para determinar los materiales con que estaba realizada, como así también los espesores de los mismos y poder cuantificar la carga por metro cuadrado de la misma.

Fig. 23. Corte longitudinal de la cubierta



Se determinó que la cubierta está conformada por bovedillas de 18 cm x 28 cm x 3.6 cm de alto, asentadas sobre las correas, sobre las que se encuentran colocadas tejas españolas con una argamasa de 4 cm de espesor utilizada como mortero de asiento (Figs. 23 y 24).

Fig. 24. Corte transversal y detalles de la cubierta

Figs. 25 y 26. Composición y estado de la estructura de cabriada

Una vez estudiada la conformación y geometría de la cubierta, se realiza el análisis de cargas sobre la misma. (Figs 23 a 24).

Tejas _____ 52.00 Kg/m²
 Bovedillas: (0.036 m x 1.00 m² x 14.00 Kg/m³) _____ 50.40 Kg/m²

Mortero: (0.09 m x 1.00 m² x 1300 Kg/m³) _____ 117.00 Kg/m²

Correas: $\frac{0.13 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} \times 690 \text{ Kg/m}^3}{0.38 \text{ m}^2}$ _____ 18.60 Kg/m²

$$D = 238.00 \text{ Kg/m}^2$$

$$\alpha = 31^\circ \text{ _____ } L = 15.00 \text{ Kg/m}^2$$

Cargas sobre los pares

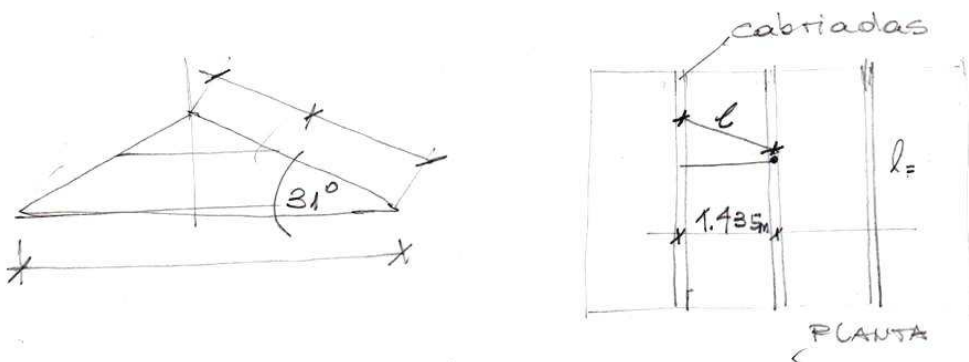


Fig. 27

D de cubierta _____ $238 \text{ Kg/m}^2 \times \frac{1.435 \text{ m}}{\cos 31^\circ} = 398.5 \text{ Kg/m}$ _____ D = 0.40 t/m

L de cubierta _____ $15 \text{ Kg/m}^2 \times \frac{1.435 \text{ m}}{\cos 31^\circ} = 25.5 \text{ Kg/m}$ _____ L = 0.025 t/m

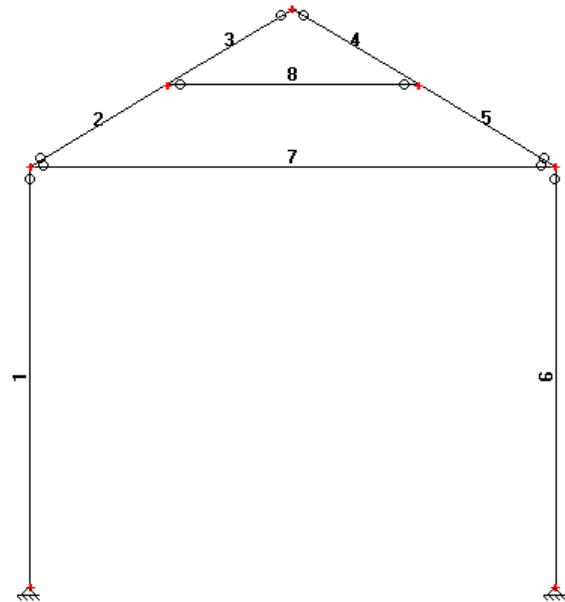
Peso propio _____ $0.17 \times 0.105 \times 690 \text{ Kg/m}^3 = 12 \text{ Kg/m}$ _____ pp = 0.012 t/m

Para el cálculo de las solicitaciones y de la deformabilidad de la estructura, con los datos ya obtenidos se utilizó el software Strap. (Tablas 1 y 2, Fig. 27).

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO		Em		Eef	
	Kg/m ³	t/m ³	Kg/cm ²	t/m ²	Kg/cm ²	t/m ²

Mampostería	1300	1.3	16000	160000	-----	-----
Algarrobo	690	0.69	63667	636670	24448.1	244481
					(Kmod=0.6x0.8x0.8)	

Tabla 1. Datos materiales



Nº DE BARRA	b (cm)	h (cm)
1 (Mamp)	99	60
2	1015	17
3	1015	17
4	10.5	17
5	10.5	17
6 (Mamp)	70	60
7	15	17
8	13	10.5

Tabla 2. Secciones de las barras
Fig. 27. Geometría de la cabriada

- Combinaciones de cargas (según lo establecen las Normas Brasileiras BR7190) (Fig. 28):

Para cálculo de las sollicitaciones y verificación de la resistencia: $1.3 g + 1.4 p$

$$1.3 \times (0.4 + 0.012) + 1.4 \times 0.025 \quad \underline{q1 = 0.570 \text{ t/m}}$$

Para verificar la deformabilidad: $1 g + 0.2 p$

$$1 \times (0.4 + 0.012) + 0.2 \times 0.025 \quad \underline{q2 = 0.417 \text{ t/m}}$$

Peso Propio de la Estructura

Cargas perm. de Cubierta

Sobrecarga Variable

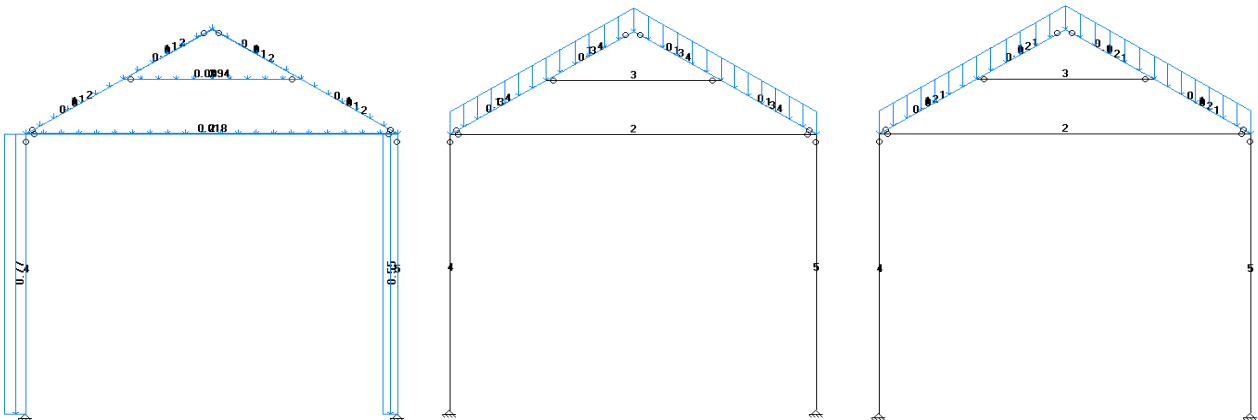
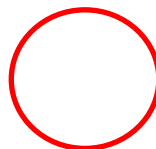


Fig. 28. Diagramas de Cargas

- Resultados obtenidos:(Tabla 3. Figs. 29, 30 y 31)



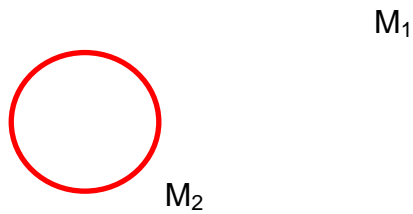


Fig. 29. Diagrama de Momentos Flectores

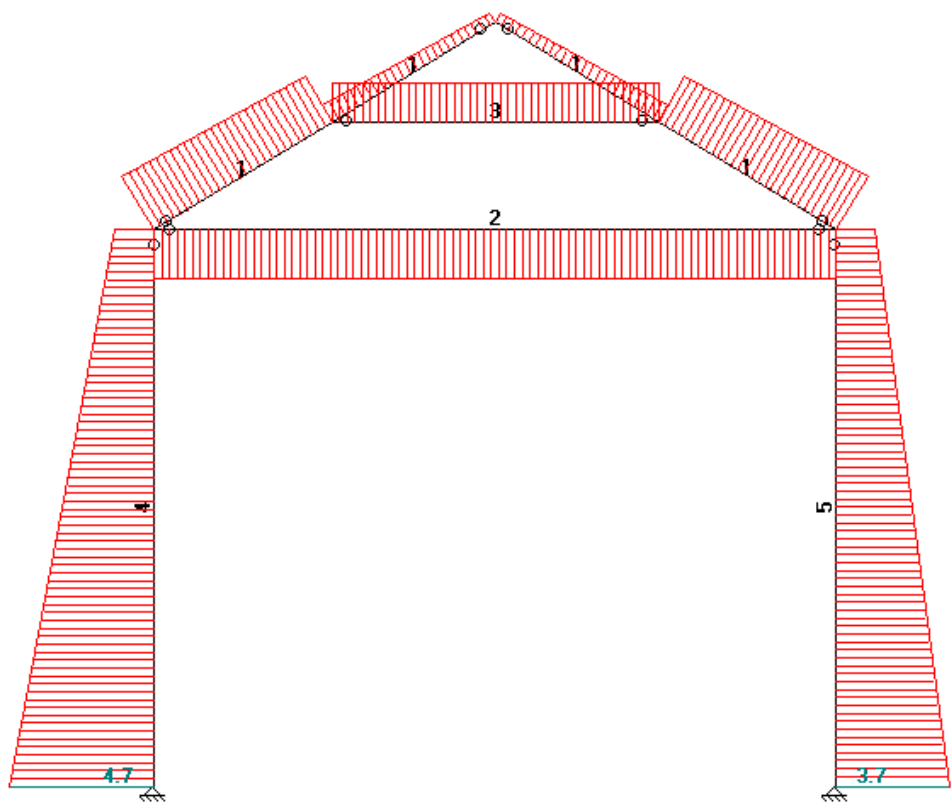


Fig. 30.

Diagrama de Esfuerzos Normales

Nº de barra	Denominación	Esfuerzo de Tracción	Esfuerzo de Compresión
7	tensor	3204 Kg	-----
8	nudillo	-----	-----
2,3,4,5	pares	-----	3738 Kg

Tabla 3. Máximas solicitaciones en barras

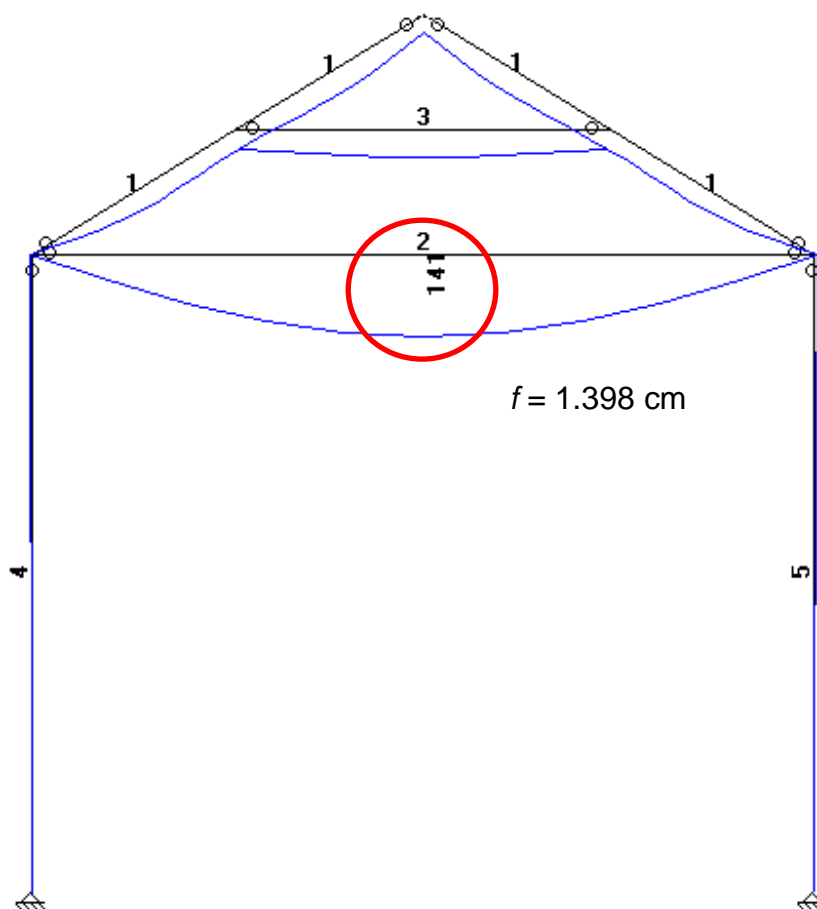


Fig. 31. Descensos Máximos

- Verificación del estado límite de deformación

Flecha Máxima relevada :

Dada la irregularidad del tensor la medición realizada en obra del descenso arrojó un valor aproximado de 1 cm

Flecha Máxima de Cálculo = 1.398 cm > Flecha Máxima relevada = 1 cm

Verificación seccional

Verificación seccional de los pares :

$$M_1 = 10.91 \text{ Tcm} \qquad N = 2.67 \text{ t}$$

$$W = \frac{10.5 \times 17}{\times} = 302.37 \text{ cm}^3 \qquad A = 178 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{\quad}{\quad} + \frac{\quad}{\quad} = 51.08 \text{ kg/cm}^2 \leq 103.95 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{VERIFICA}$$

- Verificación seccional del tensor :

$$M_2 = 9.1 \text{ tcm} \qquad N = 2.088 \text{ t}$$

$$A = 255 \text{ cm}^2 \qquad W = 637 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = \frac{\quad}{\quad} + \frac{\quad}{\quad} = 22.38 \text{ kg/cm}^2 \leq 103.95 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{VERIFICA}$$

Conclusiones finales

El resultado del comportamiento del entrepiso conformado por vigas de madera de quebracho blanco y pequeñas bóvedas de caña y yeso fue aceptable ya que para las cargas permanentes y cargas de uso las tensiones de trabajo no superaron las tensiones de cálculo y las deformaciones máximas están dentro de las consideradas admisibles para esta tipología estructural. Lo mismo ocurrió para los cabios de madera de algarrobo en las galerías .

Si bien es cierto que las flechas medidas en obra superan las deformaciones consideradas admisibles, eso se puede atribuir a una disminución de la sección neta de las vigas por la formación de galerías producidas por insectos, detectadas en el estudio microscópico.

En cuanto máximo descenso de la viga reticulada, menor que el esperado, y contrariamente a lo que ocurre cuando las uniones son mecánicas, (bulones), en este caso las uniones tradicionales por encastre no dan lugar a una mayor deformación.

Con respecto a las galerías de insectos, que debilitan la madera y facilitan su putrefacción, se propone en primer lugar realizar reparaciones necesarias para impedir el aumento de contenido de humedad de la madera, 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.

Bibliografía

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) - NBR 7190 –
Projeto de Estruturas de Madeira. Río de Janeiro.

ESTRUCTURAS DE MADERA - Ing. José Luis Gomez

ESTRUCTURAS DE MADERA - DISEÑO Y CALCULO - R. Argüelles Alvarez y F.
Arriaga Martitegui.