

INSPECCIÓN Y RESTAURACIÓN DE LA CUBIERTA DE MADERA LAMINADA ENCOLADA DE UNA PISCINA CLIMATIZADA

V. BAÑO

Prof. Dr. Ing. For.
IET, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo; Uruguay
vanesab@fing.edu.uy

L. D. DOMENECH

Ayudante Ing. Civil
IET, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo; Uruguay
ldaguiar@fing.edu.uy

G. P. CETRANGOLO

Prof. MSc. Ing. Civil
IET, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo; Uruguay
gonzaloc@fing.edu.uy

A. A. MORQUIO

Prof. Dr. Ing. Civil
IET, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo; Uruguay
atilio@fing.edu.uy

RESUMEN

Se presentan los resultados de la inspección del estado estructural de la cubierta de madera laminada encolada de una piscina climatizada de 500 m² de superficie, así como la propuesta de restauración de los elementos con daños estructurales causados por el fallo del adhesivo. La cubierta está formada por seis vigas principales de 20 m de longitud, correas y cabios de madera laminada encolada de Pino Paraná (*Araucaria araucana*). La rehabilitación consistió en refuerzos metálicos en las vigas principales. Luego se estimaron, mediante una simulación numérica según el método de los elementos finitos, las tensiones producidas tras la rotura de las vigas, así como las esperadas una vez realizada la restauración. En el caso de los elementos secundarios, se sustituyeron las condiciones de apoyo de los cabios en las correas y se reforzaron las correas de modo similar a las vigas principales.

1. INTRODUCCION

La cubierta de la piscina climatizada, de 500 m², fue construida en el año 2000, empleando madera laminada encolada de Pino Paraná (*Araucaria angustifolia*), de procedencia argentina, para la constitución de los elementos estructurales. Sobre éstos se colocó, como cerramiento, vidrio templado de 14 mm de espesor. Según información facilitada por el propietario de la piscina, a los elementos estructurales de madera se les aplicó un tratamiento protector en profundidad mediante la impregnación de la madera con sales CCA (Cobre, Cromo y Arsénico).

El adhesivo empleado en el encolado de las vigas, declarado por el fabricante, fue de tipo resorcínico. Sin embargo, no existen datos del control de calidad de la fabricación de las vigas ni de los ensayos iniciales, declaración requerida de acuerdo a las especificaciones definidas en las normativas relativas a los requisitos de fabricación de vigas de madera laminada encolada [1], [2]. Como referencia de las propiedades mecánicas de la madera empleada, se toma en consideración la que utilizó el arquitecto proyectista para el cálculo de la estructura de madera laminada encolada en el año 1997, quién asumió una clase resistente C22, según la norma europea EN 338 vigente en ese momento [3].

Entre los años 2002 y 2007 se recogieron una continuidad de informes sobre las actuaciones realizadas en la cubierta debido a la entrada de agua por el cerramiento de vidrio. En el año 2010 se produjo la rotura de la viga V2 y en el año 2013 la rotura de la viga V6. La Figura 1 a) muestra un esquema de la designación de los elementos estructurales de la cubierta, nombrando las seis vigas principales desde V1 hasta V6 y las correas ubicadas entre las vigas principales desde C1 hasta C9. La Figura 1 b) muestra el estado inicial de la estructura de la cubierta, con el apuntalamiento temporal de las vigas principales, mediante pilares de madera, después de haberse producido la rotura de las vigas V2 y V4.

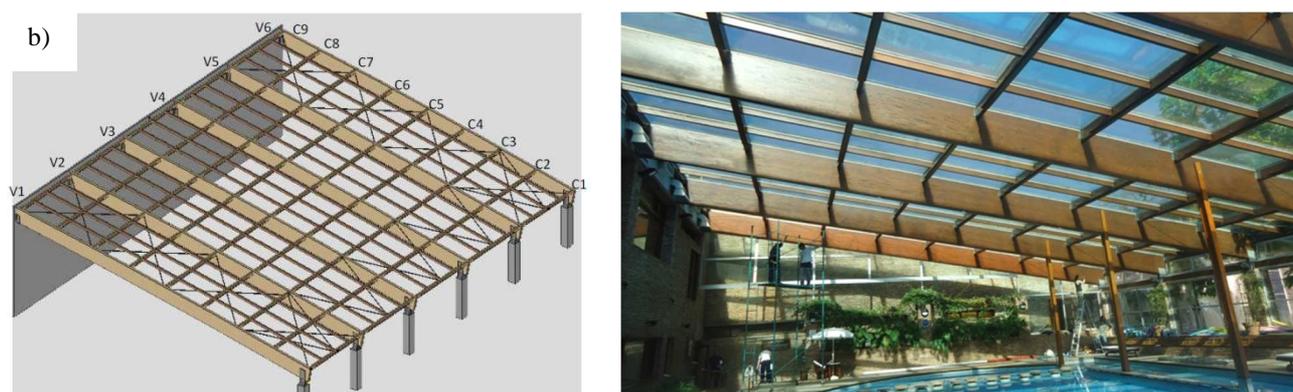


Figura 1: a) Esquema de la cubierta; b) situación de la cubierta previo a la intervención.

El objetivo del presente trabajo es documentar un caso de estudio de una estructura de una cubierta de madera laminada encolada que presenta daño estructural en sus vigas principales y secundarias, desarrollar la metodología utilizada en la inspección, en la propuesta de rehabilitación y en el ajuste de la intervención a la estructura en particular para su reparación y correcto funcionamiento desde el punto de vista estructural, sin la remoción del cerramiento de vidrio y evitando la colocación de pilares intermedios.

2. INSPECCIÓN DE LA ESTRUCTURA

2.1. METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN

2.1.1. Inspección visual y ensayos no destructivos (NDT)

Se realizó una inspección visual de las correas que bordean el vaso de la piscina y de los tramos de las vigas principales accesibles con andamio desde el perímetro de la piscina.

La medición del contenido de humedad de la madera se realizó mediante los equipos: Aquameter T-M-160, de la marca James Instruments, de medición superficial; y SONIN Model 50211, que permite determinar el contenido de humedad a una profundidad de entre 1 y 2 cm desde la superficie de la madera. Las propiedades mecánicas de la madera consideradas en el cálculo estructural están referidas a un contenido de humedad del 12%, y éstas disminuyen a medida que el contenido de humedad aumenta [4].

Para la estimación de la clase resistente de la madera utilizada en la obra se realizaron ensayos no destructivos en varios puntos de los elementos estructurales de la cubierta. Se midió la velocidad de transmisión de onda ultrasónica a través de la madera en dos direcciones: longitudinal y transversal. La medición se realizó con el equipo PROCEQ, modelo Pundit Lab, dotado de dos transductores de 54 kHz, uno emisor y otro receptor.

El resultado directo obtenido fue el tiempo de transmisión de la onda (t) entre dos puntos de manera que, conocida la distancia entre ellos (d), permitió obtener la velocidad de transmisión de onda (v) en las dos direcciones medidas. En base a los resultados de velocidad de transmisión de onda ultrasónica en las direcciones longitudinal (paralela a la dirección de la fibra) y transversal (perpendicular a la dirección de la fibra), se estimó el módulo de elasticidad dinámico paralelo a la fibra ($E_{dyn,0}$) y perpendicular a la fibra ($E_{dyn,90}$) de la madera al contenido de humedad presente medido (16%). Para esto se tomaron tramos de viga sin líneas de cola ni *finger-joint* entre los puntos de medición, de modo de obtener valores correspondientes a las láminas de madera aserrada empleadas para la fabricación de las vigas laminadas. En la Figura 2 se representan los dos tipos de mediciones ultrasónicas realizados en los elementos de madera de la cubierta: directa en la dirección perpendicular a la fibra de la madera e indirecta en la dirección longitudinal.

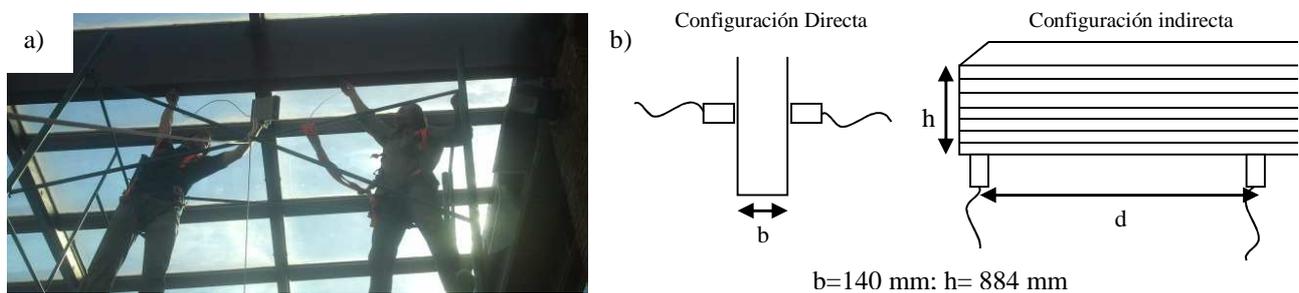


Figura 2: a) Medición de la velocidad de onda ultrasónica en la cubierta de la piscina; b) medición directa en la dirección perpendicular a la fibra y medición indirecta en la dirección paralela a la fibra.

2.1.2. Estimación de las propiedades mecánicas de la madera para el cálculo estructural

El módulo de elasticidad dinámico (E_d) se determinó a partir de la Ecuación 1 [5], tomándose una densidad (ρ) de la madera de Pino Paraná (*Araucaria angustifolia*) procedente de Argentina de 400 kg/m^3 para un grado estructural 2 [6].

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

La asignación de una clase resistente de la madera en base la obtención del módulo de elasticidad dinámico pasa por la estimación del módulo de elasticidad estático a partir de ecuaciones que relacionen ambos valores para cada especie, procedencia de madera y contenido de humedad dado. Debido a que no se encontró bibliografía científica sobre dicha ecuación para la especie *Araucaria angustifolia* para la humedad a la cual se encontraba la madera, se siguió el siguiente procedimiento: primero, se estimó el módulo de elasticidad dinámico para el 12% de humedad en función del módulo de elasticidad dinámico para el 16% (calculado mediante ultrasonido) [7]; segundo, se estimó el módulo de elasticidad estático para el 12% de contenido de humedad (en base a una disminución con respecto al estático de entre un 20 y 30%), tomado como valor medio de esta relación para varias especies de coníferas [8], [9]. A partir del módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra estático, se determinaron los módulos de elasticidad a tracción y a compresión a partir de las Ecuaciones 2 y 3.

$$\frac{E_t}{E_c} = 1,2 \quad (2)$$

$$E_{ml} = \frac{4E_t E_c}{(\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c})^2} \quad (3)$$

A la hora de modelar la estructura con el objetivo de estimar las tensiones en las vigas principales producidas durante su rotura y su posterior restauración, se consideró a la madera como un material ortótropo con las constantes elásticas definidas a continuación: módulo de elasticidad a tracción (E_t) igual a 14,0 GPa, módulo de elasticidad a compresión (E_c) igual a 11,7 GPa, módulo de elasticidad perpendicular a la fibra (E_{90}) igual a 0,425 GPa, coeficientes de Poisson (μ) igual a 0,4, módulo de corte longitudinal-radial y longitudinal-tangencial (G_{lr} y G_{lt}) igual a 0,80 GPa y módulo de elasticidad radial-tangencial (G_{rt}) igual a 0,08 GPa [10].

2.2. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN

En las correas se detectaron fallos por esfuerzos de tracción perpendicular a la fibra, unidos a fallos de delaminación en línea de cola y en la unión *finger-joint* entre las testas de las láminas, tal como se muestra en la Figura 3. La mayor parte de las reacciones en los apoyos de los cabios recaen sobre unos rastreles de apoyo fijados a la parte inferior de las correas mediante tirafondos, provocando que la carga de la cubierta se aplique únicamente sobre las tres láminas inferiores de la correa, en lugar de sobre toda la sección de la misma. Esta disposición constructiva, que se muestra en la Figura 4 a), suele llevar a un fallo por tracción perpendicular a la fibra en las correas [10]. La deficiencia en el encolado de las correas, provocó que la rotura se produjese en la línea de adhesivo, tal como se muestra en la figura 4 b).

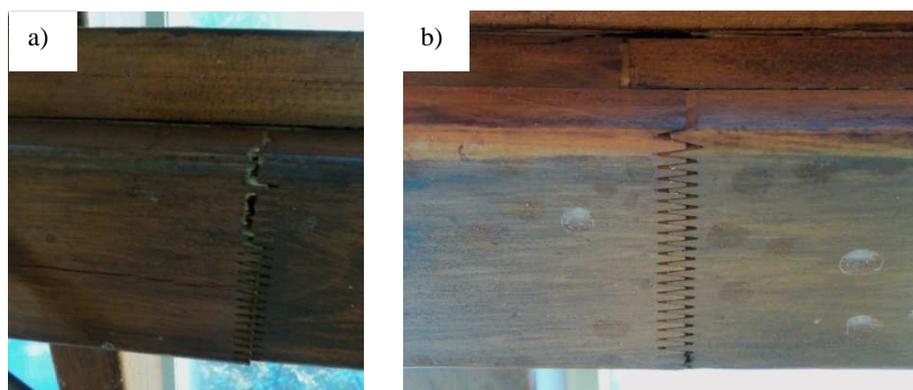


Figura 3. a) Desencolado en la unión *finger-joint* entre las testas de las láminas en una correa en la cual rompió parcialmente el dentado del *finger-joint*; b) desencolado en la unión *finger-joint*.

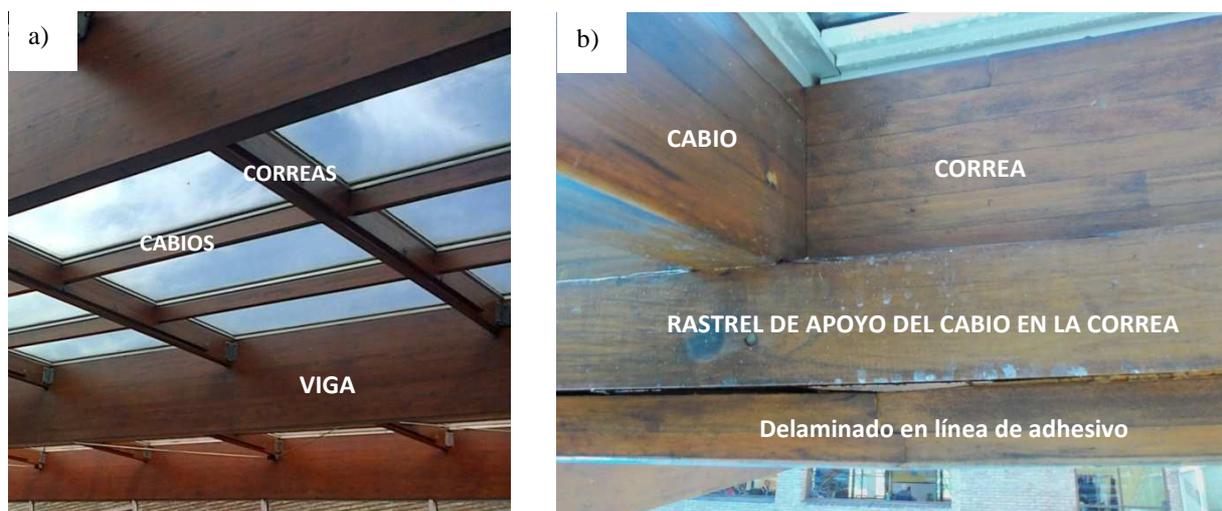


Figura 4: a) Disposición de los elementos en la cubierta; b) delaminación pasante en la segunda línea inferior de cola.

En las vigas principales de madera laminada encolada se observan indicios de delaminación en muchas de las líneas de cola que las componen, además de la rotura por tracción en las uniones *finger-joint* de las láminas inferiores de las vigas V2 y V4, como se muestra en la Figura 5. En ambos casos, la rotura se produjo aproximadamente a una distancia de un tercio de la longitud del vano del apoyo inferior de las vigas.

En la Figura 5 a) y 5 b) se puede observar que la rotura se produjo por la combinación de delaminación en el *finger-joint* (láminas 2ª y 3ª empezando desde la parte inferior) y la presencia de nudos en las láminas 1ª y 4ª. A la vista, no se puede saber si el inicio del fallo lo produjo la presencia del nudo o la delaminación del *finger-joint*. Una vez producido el fallo, la rotura se propagó por las líneas de cola de la viga, en lugar de por la madera, lo que hace pensar, nuevamente, en un problema de encolado durante la fabricación de las vigas.

En la Figura 5 c) se observa la rotura producida en la viga V2, ya reparada, donde el fallo se produjo sin influencia de la presencia de un nudo.

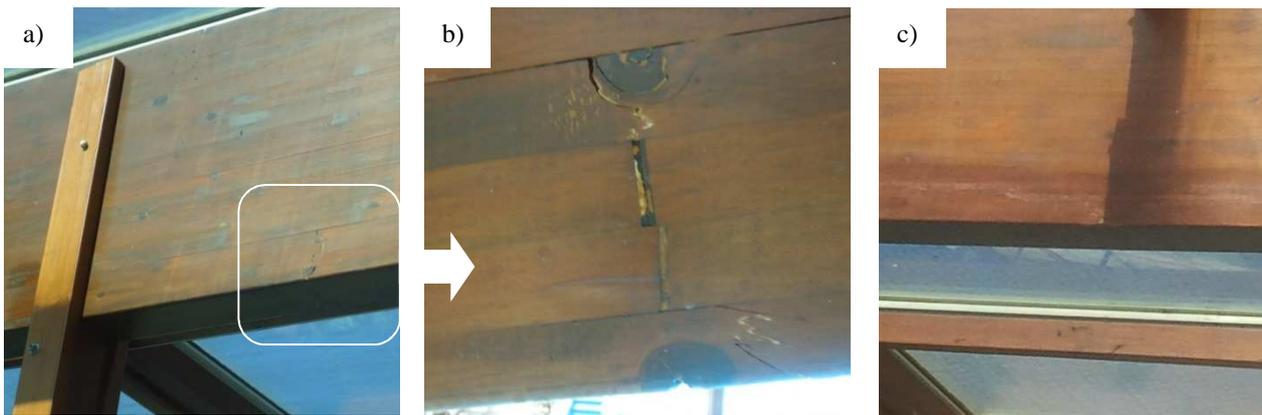


Figura 5: a) Rotura de la viga V4 por la presencia de nudos y uniones *finger-joint* encadenados; b) ampliación de la Figura 5 a); c) viga V2 ya reparada.

3. RESTAURACIÓN DE LA ESTRUCTURA

La propuesta de restauración de la cubierta se realizó a partir de un predimensionado de los elementos resistentes, tomando como hipótesis que, en el peor escenario, las vigas principales no soportarían tensiones de tracción. Posteriormente se verificó el comportamiento de la estructura en servicio mediante un análisis numérico. Además de las exigencias estructurales, en la restauración y actuación estructural preventiva de la cubierta propuesta se tuvo en cuenta la apariencia estética de la piscina, manteniendo los elementos estructurales del diseño original y las mismas luces de diseño libres. Otra de las limitantes de la intervención fue el hecho de tener que mantener el cerramiento de vidrio durante el proceso de rehabilitación.

3.1. INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL

3.1.1. Apuntalamiento de las vigas principales

Las vigas principales, de 20 m de longitud, se apuntalarán en dos puntos distantes 7 m entre sí, y a 3,5 m cada uno del eje de la viga, de modo que permitan reducir las tensiones de flexión de las vigas principales, como se muestra en la Figura 6. Las tensiones provocadas esperadas son menores a las producidas por el peso propio de la cubierta y éstas serán controladas en obra mediante la medición de las deflexiones de las vigas en los puntos de apoyo sobre los puntales. El apuntalamiento de las vigas principales se realizará en fases y no sobre la totalidad de la superficie de la cubierta para evitar, en lo posible, la rotura de los vidrios de cerramiento. Los valores de contraflechas fueron obtenidos del modelo numérico.

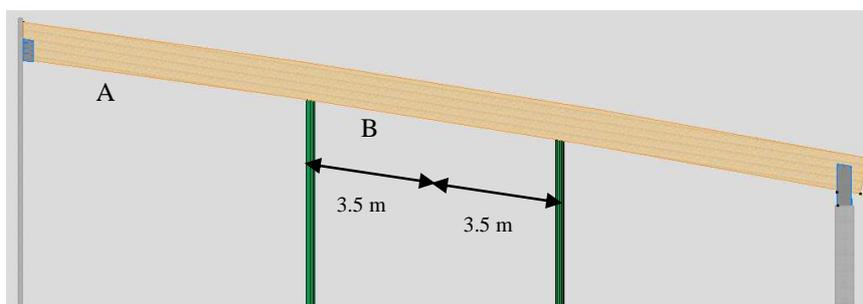


Figura 6: Colocación de los puntos de apoyo de las vigas (andamio) previo a la reparación estructural.

3.1.2 Actuación sobre las vigas principales

El refuerzo de las vigas principales se realizará mediante la colocación de pernos que atraviesen el canto de la viga y compriman las láminas de madera, la colocación de un perfil metálico UPN-120 en el canto inferior que trabaje a tracción y tensores en los apoyos para aligerar el esfuerzo de cortante, tal como se muestra en la Figura 7. Las funciones de los pernos pasantes son conseguir que las láminas que configuran las vigas de madera laminada encolada funcionen en conjunto, así como servir de unión entre los perfiles metálicos y cada una de las vigas.

Para la colocación de los pernos se realizará un taladro en la viga de 15 mm de diámetro según la dirección del canto y se introducirá un perno roscado de 20 mm de diámetro de acero al carbono clase 8.8 [11]. En el extremo inferior del perno se colocará una tuerca y una arandela para sujetar el perfil UPN-120.

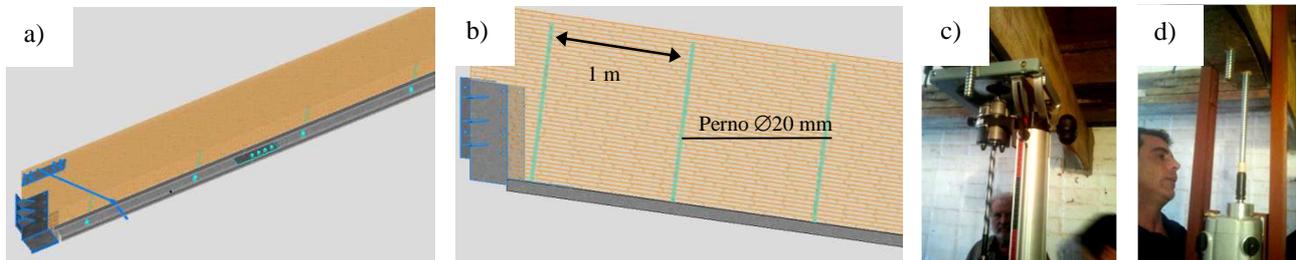


Figura 7: a) Viga principal con los elementos de refuerzo estructural; b) detalle de colocación de los pernos; c) proceso de perforación de las vigas; d) proceso de colocación de los pernos.

3.1.3 Restauración de las correas

Se plantea la colocación de herrajes de cuelgue que sirvan de apoyo a los cabios, evitando que transmitan carga sobre los rastreles de apoyo que provoquen esfuerzos de tracción perpendicular a la fibra en las correas. Para esto, se realizará un rebaje en el rastrel de apoyo de modo que evite el contacto entre el cabio y el rastrel. Al igual que en las vigas principales, se plantea un apriete de las láminas que configuran la correa de madera laminada mediante colocación de tirafondos, disminuyendo así la probabilidad de delaminación. Además, se colocará una chapa metálica en el borde inferior de las correas que trabajará a tracción en el caso de un fallo en la unión *finger-joint* y que será fijada por los tirafondos. Un esquema de la propuesta de restauración se muestra en la Figura 8.

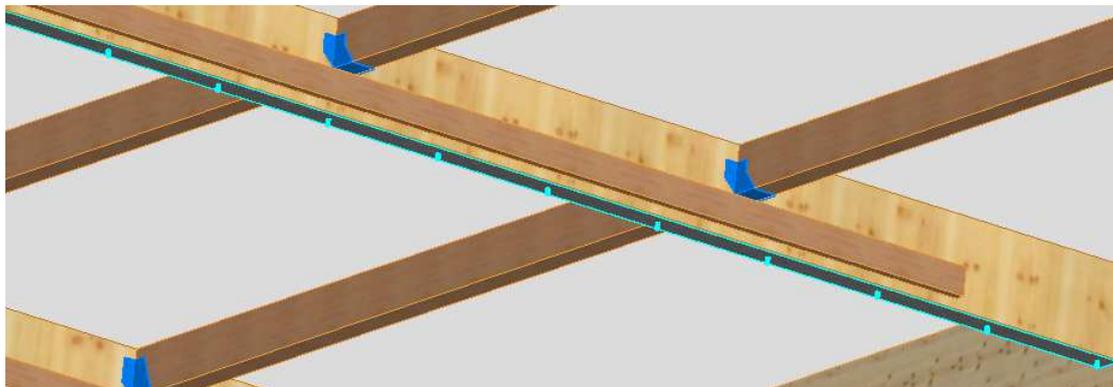


Figura 8: Detalle de apoyo de los cabios mediante herrajes de cuelgue y colocación de chapa y tirafondos en las correas.

3.2. CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFLEXIONES

3.2.1. Modelo de elementos finitos

Para el cálculo de las tensiones y deflexiones originadas una vez producida la rotura de las vigas principales, durante el proceso de restauración de éstas y al final de dicho proceso se realizó un modelo de elementos finitos 3D en el software comercial SAP2000. Las vigas principales fueron modeladas mediante elementos de área *Shell Layered/Nonlinear* considerando el comportamiento no lineal y ortótropo de la madera [12]. Las correas y los cabios fueron modelados por elementos de línea con el mismo material que las vigas principales; mientras que los vidrios se modelaron mediante elementos de área *Shell Thin*, y se los vinculó a la estructura de madera mediante resortes.

Los tornillos y los perfiles UPN-120 se modelaron mediante elementos de línea y vincularon entre sí mediante resortes que modelan el aplastamiento del acero del perfil. Análogamente, la unión entre los tornillos y las vigas de madera se realizó mediante resortes que modelan el aplastamiento de la madera. Se introdujeron las etapas constructivas de la propuesta de restauración y se efectuó un análisis *Nonlinear Staged Construction*, obteniéndose así las tensiones y deflexiones para cada etapa ingresada, variando como parámetro las contraflechas a adoptar.

3.2.2. Tensiones y deflexiones calculadas

En la Tabla 1 se presentan las contraflechas que se aplicarán en cada punto, de acuerdo a la Figura 6, en cada fase de apuntalamiento. Estas fueron obtenidas de manera de que los valores máximos de tensión en la zona fisurada una vez terminada la restauración fueran iguales a los de la misma sección, previo a la falla. En la Tabla 2 se presentan las tensiones máximas en servicio en la sección central y a aproximadamente un tercio del apoyo, sobre la fisura, de la viga V4 para las distintas etapas ingresadas en el modelo; así como la deflexión máxima. Las tensiones y deflexiones para toda la viga y para cada etapa son representadas en la Figura 9.

Antes de producida la rotura de la viga, las tensiones y deflexiones son las esperadas de acuerdo a la geometría de la viga y a las cargas de peso propio actuantes. Una vez producida la fisura, las tensiones en la sección central no se ven afectadas, lo que resulta esperable si se considera el principio de Saint-Venant. Sin embargo, en la sección sobre la fisura las tensiones aumentan considerablemente, particularmente las de tracción, haciéndose incluso mayores a las de la sección central. Las deflexiones se modifican relativamente poco, aumentando la deflexión máxima un 2%.

Durante la fase 4 del proceso de restauración sobre la viga V4, correspondiente a la aplicación de la máxima contraflecha, las tensiones no cambian de signo y son significativamente menores. Por esta razón no se compromete el funcionamiento ni la seguridad de la viga de madera durante la restauración. Finalmente, una vez terminada la restauración, las tensiones máximas resultan menores a las originales, propias de la etapa antes de la rotura. En la sección de la fisura las tensiones máximas son prácticamente iguales a las originales; resultado esperado puesto que la restauración y, particularmente, las contraflechas elegidas fueron pensadas para recomponer el funcionamiento estructural original de la sección dañada. Como consecuencia del aumento del aumento de rigidez global, la deflexión máxima final resulta en un 18% menor a la deflexión máxima antes de producida la fisura.

Tabla 1. Contraflecha a aplicar en los puntos A y C de las vigas en cada fase de apuntalamiento.

	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6
Fase 1	12 mm	X	X	X	X	X
Fase 2	12 mm	24 mm	12 mm	X	X	X
Fase 3	X	12 mm	24 mm	12 mm	X	X
Fase 4	X	X	12	24 mm	12 mm	X
Fase 5	X	X	X	12	24 mm	12 mm
Fase 6	X	X	X	X	12 mm	17 mm

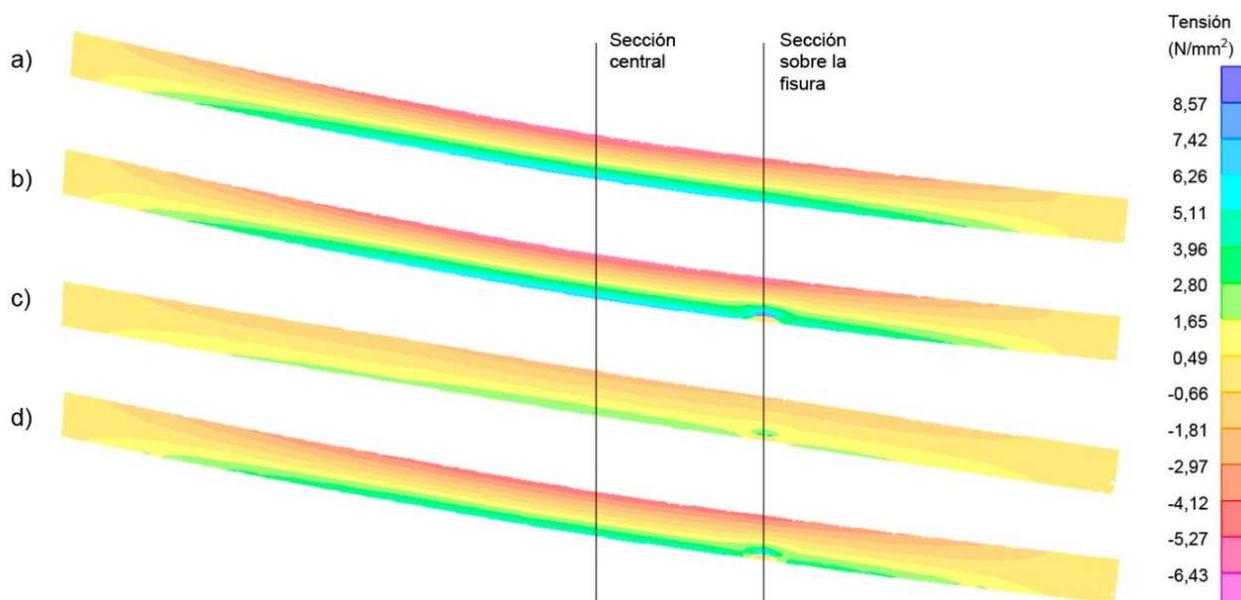


Figura 9: Tensiones y deflexiones a) antes de producida la fisura, b) después de producida la fisura, c) durante el proceso de restauración, d) terminado el proceso de restauración.

Tabla 2. Tensiones y deflexiones máximas en servicio de la viga V4 obtenidas a partir del modelo computacional.

Etapa	Sección central		Sección en la fisura		Deflexión máxima
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión	
Antes de producirse la fisura	7,0 N/mm ²	6,4 N/mm ²	6,0 N/mm ²	5,5 N/mm ²	4,72 cm
Después de producirse la fisura	7,0 N/mm ²	6,4 N/mm ²	8,7 N/mm ²	6,6 N/mm ²	4,81 cm
Durante el proceso de restauración	2,9 N/mm ²	2,7 N/mm ²	3,1 N/mm ²	2,2 N/mm ²	1,90 cm
Final	5,1 N/mm ²	5,6 N/mm ²	5,9 N/mm ²	5,4 N/mm ²	3,85 cm

Además de las vigas principales, se verificó el resto de los elementos estructurales (correas, vidrios, pernos, perfiles metálicos). Los resultados obtenidos muestran que se verifican los estados límites últimos y de servicio de todos los elementos con una seguridad adecuada.

4. COMENTARIOS FINALES

Se logró el objetivo de documentar la metodología empleada para la inspección, propuesta de rehabilitación y ajuste de la intervención de acuerdo a las limitantes de proyecto geométricas, ambientales y estéticas de la cubierta de madera laminada encolada de una piscina climatizada. La solución estructural propuesta, asumiendo la hipótesis de no resistencia a tracción de la madera de las vigas principales, fue validada mediante un modelo computacional de la totalidad de la cubierta modelada en 3D.

Al momento de escribir este trabajo se están realizando las intervenciones necesarias sobre la cubierta de la piscina. Durante el proceso de restauración de las vigas principales se validarán, de forma experimental, los resultados obtenidos del modelo presentados anteriormente.

5. REFERENCIAS

- [1] Comité Europeo de Normalización, “UNE-EN 14080:2013. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos”, 2013, 110 p.
- [2] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 9660-1. Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control”, 2005, 27 p.
- [3] Comité Europeo de Normalización, “UNE-EN 338:1995. Madera Estructural. Clases resistentes”, 2010, 10 p.
- [4] Comité Europeo de Normalización, “UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.”, 2010, 20 p.
- [5] Pellerini, R. F.; Ross, R. J., “Nondestructive Evaluation of Wood”, *Forest Products Society*, Madison, Wisconsin, 2002, 210 p.
- [6] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, “CIRSOC 601. Reglamento argentino de estructuras de madera”, 2013, 176 p.
- [7] Sandoz, J. L., “Grading of construction timber by ultrasound”, *Wood Science and Technology*, Vol. 23, 1989, pp.95-108.
- [8] Íñiguez, G., “Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural”, *Universidad Politécnica de Madrid*, Madrid, España, 2007, 236 p.
- [9] Vega, A., “Caracterización mecánica de la madera estructural de *Castanea saiva* Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos”, *Universidad de Santiago de Compostela*, Lugo, España, 2013, 247 p.
- [10] Arguelles, R.; Arriaga, F.; Martínez, J. J., “Estructuras de madera: diseño y cálculo”, *AITIM*, Madrid, España, 2000, 720 p.
- [11] Rotho Blaas, “Rothofixing: Carpintería de madera”, 2012, 260 p.
- [12] Computers & Structures Inc., “CSI Analysis Reference Manual: For SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge”, Berkeley, Estados Unidos de América, 2014, 524 p.