



PROPUESTA DE MODELADO DE ESTRUCTURAS COMPLEJAS DE MADERA: MUSEO DE ARTE LATINOAMERICANO EN URUGUAY

MODELLING PROPOSAL OF COMPLEX TIMBER STRUCTURES: A LATIN AMERICAN MUSEUM CASE STUDY

Domenech, Leandro ⁽¹⁾*; Mazzey, Carlos ⁽²⁾; Baño, Vanesa ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Ing. Civil. OAK Ingeniería. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾ Dr. Ing. Montes. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

* Contacto: ldaguaiar@fing.edu.uy

CÓDIGO: 4604292

Resumen

El desarrollo tecnológico de los productos de ingeniería de madera ha abierto un abanico de posibilidades a los arquitectos e ingenieros. Como consecuencia, las estructuras de madera se han tornado cada vez más complejas de modelar, lo que se combina con las dificultades inherentes al material. Este artículo presenta una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas de madera a partir de un caso particular: el Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay. La sala de esculturas del museo presenta una cubierta de doble curvatura, con vigas —curvas y de sección variable— y correas de madera laminada encolada. La metodología consiste en la utilización sinérgica de dos softwares: el SAP2000, que permite el modelado y análisis estructural mediante el método de los elementos finitos; y el MATLAB, que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. En este último se pueden generar —mediante un algoritmo— las matrices (de nodos, de conectividad o de solicitaciones, por ejemplo) del sistema a introducir en el SAP2000, para luego resolver el problema y analizar los resultados. Este método posibilita la modelización y el análisis de estructuras como la del museo, que, ya sea por la complejidad de su geometría, por la dificultad en la introducción de las cargas o por otra particularidad, hagan inviable el modelado directo a partir de la utilización de un solo único software.

Palabras-clave: madera, análisis estructural, modelado, programación.

Abstract

The technological development of wood engineered products has opened a world of possibilities to architects and engineers. Consequently, timber structures have become more complex to model, which adds to the inherent difficulties of the material. This paper presents a methodological proposal to model complex timber structures from a case study: the Museum of Latin American Art in Uruguay. The museum's sculpture room has a double-curved roof, with glulam purlins and beams —of curved axis and variable section—. The method consists in the synergic use of two software: SAP2000, which allows to model and analyze a structure using the finite element method; and MATLAB, which offers an integrated development environment with its own programming language. The latter allows to generate —with an algorithm— the system matrices (e.g., of nodes, connectivity or forces) to be introduced in SAP2000, to then solve the problem and analyze the results. This method allows to model and analyze structures such as the museum, which either by the complexity of its geometry, by the difficulty in the introduction of the loads or by another particularity, make direct modeling infeasible from the use of a single software.

Keywords: timber, structural analysis, modelling, scripting.



1. INTRODUCCIÓN

La madera, junto a la mampostería, es el material más antiguo usado en la construcción. Entre finales del siglo XIX y XX, los países occidentales la sustituyeron parcialmente por nuevos materiales, como el hormigón o el acero. Sin embargo, en las últimas décadas, y en una transición hacia un modelo de bioeconomía, la construcción con madera se ha incrementado y convertido en un fenómeno global (Dangel 2016). Este incremento no se debe únicamente a sus conocidas ventajas ambientales, sino también a las estructurales —buena relación resistencia-peso propio—, las estéticas, de ahorro de energía en su proceso de producción (con respecto a otros materiales), de disposición final tras su vida útil, etc.

El desarrollo de diversos productos de ingeniería de madera (EWP, del inglés *Engineered Wood Products*) ha sido un motor fundamental en la popularización de la madera como material estructural. En el último siglo, los sistemas constructivos con madera han pasado del uso de madera aserrada de pequeñas secciones para “entramado ligero”, al sistema “poste y viga” con piezas de mayor sección —principalmente de madera laminada encolada (MLE)— al uso de grandes volúmenes de madera en forma de paneles en el sistema constructivo “*mass timber*” (Natterer 2004). Aunque la evolución en la aparición de los sistemas constructivos sigue este orden, actualmente conviven todos los sistemas. Con el fin de cubrir grandes superficies con un bajo volumen de madera, surgen las estructuras tipo “cáscara”, “membrana” o *shell*, mucho más eficientes en la relación entre su resistencia estructural y el volumen de madera utilizado.

Los EWP han abierto un abanico de posibilidades a los arquitectos e ingenieros a la hora de diseñar estructuras, con piezas capaces de salvar grandes luces y con elementos de secciones, curvaturas y formas variables. Como consecuencia, las estructuras de madera se han tornado cada vez más complejas de modelar, lo que se combina con las dificultades inherentes al material (como su ortotropía, el comportamiento elastoplástico en compresión, y el análisis a largo plazo). Ejemplos destacados de estructuras tridimensionales de madera en Europa son las obras del ingeniero Julius Natterer —como el ExpoDach2000 en Hannover— (Natterer 2004).

En Uruguay existen básicamente tres limitantes en la concepción de un proyecto estructural complejo (espacial) de madera. La primera se debe a la escasa tradición en la construcción con madera en el país (en parte, debido a que las primeras plantaciones forestales son de la década del 90); la segunda está relacionada con la falta de EWP de producción local; y la tercera con la escasa formación académica en estructuras de madera. El creciente interés de la industria local en el desarrollo de productos estructurales en madera, ligado a la actual oferta de formación en ingeniería civil, arquitectura e ingeniería forestal (Baño and Moya 2018) está haciendo que estas limitantes se puedan salvar en un corto plazo de tiempo.

El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas de madera a partir de un caso particular de una estructura tridimensional: el Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay. La sala de esculturas del museo es la primera estructura espacial compleja que se diseña en el país, utilizando elementos de madera laminada encolada de sección variable y doble curvatura. Este tipo de estructuras requiere de un enfoque de modelado y diseño estructural distinto al tradicional, en el que se utilice más de un *software* para viabilizar el análisis estructural.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El Museo de Arte Latinoamericano es un proyecto cultural —de exhibición y promoción del arte— que albergará colecciones de reconocidos artistas latinoamericanos (como Soto, Cruz-Diez, Torres García y Le Parc, entre otros). Está prevista su inauguración en Manantiales —Maldonado, Uruguay— para la temporada estival de 2020-2021.



2.1. Descripción del proyecto

La obra se emplazará dentro del predio de la Fundación Atchugarry, una organización sin fines de lucro creada por el escultor uruguayo Pablo Atchugarry con el fin de promover las artes. Pablo Atchugarry —principal impulsor del proyecto— planteó como objetivo para el museo amalgamar el arte latinoamericano y poner en comunión obras de distintos artistas de la región.

El diseño arquitectónico y proyecto del museo está a cargo del arquitecto uruguayo Carlos Ott. Ott ganó el reconocimiento internacional cuando ganó, entre más de 700 proyectos, el concurso internacional para construir el edificio de la Opera de la Bastilla en París. Hoy en día, su estudio de arquitectura cuenta con oficinas en Toronto, Quebec, Shanghai, Dubai y Montevideo. Algunas de sus obras destacadas son: la Terminal de pasajeros del Aeropuerto Internacional de Ushuaia Malvinas Argentinas (1995, Argentina); el National Bank of Dubai (1997, Emiratos Arabes); y la Torre de las Telecomunicaciones de Montevideo (2002, Uruguay).

El presente caso de estudio se centra en la estructura de la cubierta de la sala de esculturas, cuyo diseño estructural está a cargo del estudio Oak Ingeniería (integrado por los autores de este artículo). La estructura cubrirá un área de 1600 m² y será realizada, casi en su totalidad, por elementos de MLE de procedencia aún no definida. La Figura 1 muestra tres fases representativas del diseño del presente proyecto: partiendo de líneas conceptuales, se finaliza con la elaboración de un modelo tridimensional de la ingeniería.

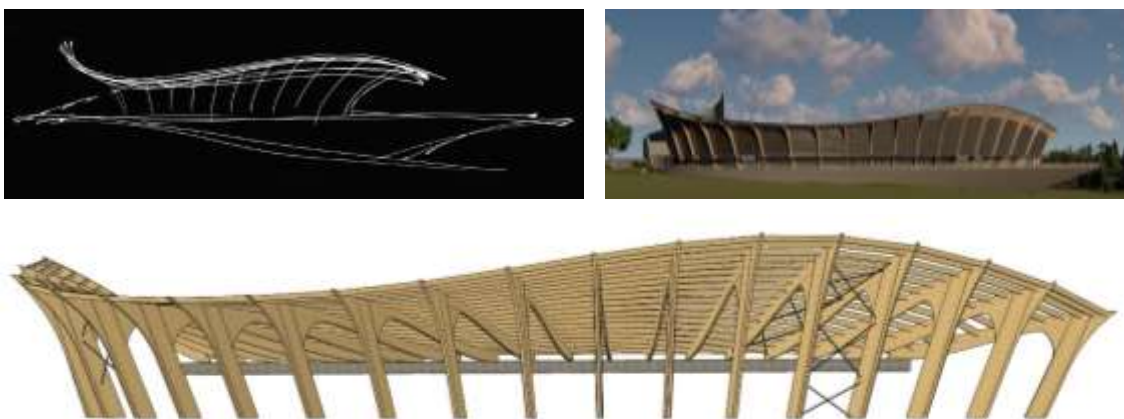


Figura 1: Museo de Arte Latinoamericano de la Fundación Atchugarry; a) diseño conceptual (Carlos Ott), b) render y fotomontaje, y c) modelo BIM de ingeniería (Oak Ingeniería)

2.2. Geometría de la estructura

La estructura de la cubierta se compone, simplificada, de tres elementos principales: a) pórticos principales; b) correas; y c) elementos de arriostramiento. La Figura 2 muestra, de forma esquemática, las medidas en planta.

Los 19 pórticos son de geometría (longitud, altura y forma) única, de manera de otorgarle una doble curvatura a la cubierta. Cada pórtico se compone de una viga simple de curvatura y sección variable (135 x 1000-1300 mm²), unida rígidamente en el vértice a un pilar doble de sección constante (2 x 90 x 1300 mm²). Adicionalmente, por razones estéticas, se dispone de un elemento curvo de sección variable, paralelo a los pilares, con el fin de generar vértices en fachada sin sacrificar la clase de servicio a la cual estará sometida la unión rígida. La longitud horizontal máxima es de aproximadamente 27,45 m (pórtico 13, Figura 3.a), y la altura vertical máxima al vértice de fachada es de aproximadamente 15.23 m (pórtico 19, Figura 3.b)

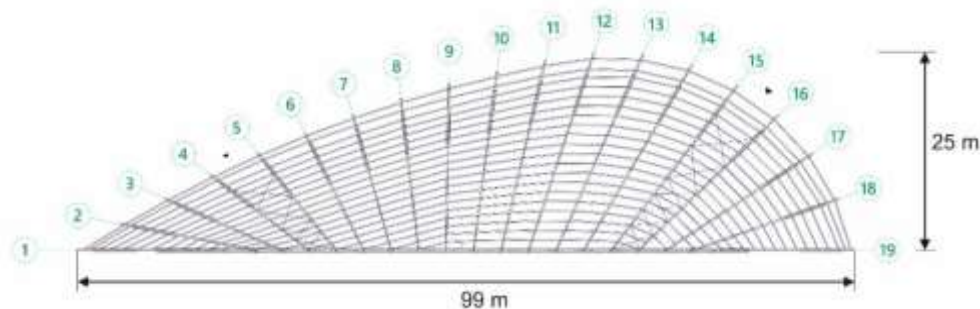


Figura 2: Planta de la estructura de cubierta (Oak Ingeniería)

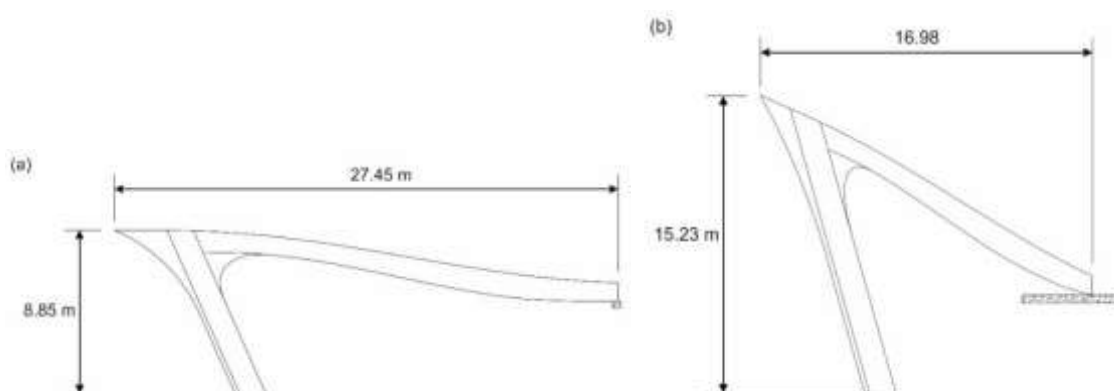


Figura 3: a) Pórtico 13, y b) pórtico 19 (Oak Ingeniería)

3. ACCIONES DE VIENTO

Dada la geometría particular de la cubierta, el estudio de la acción del viento sobre la estructura resulta de gran interés y requiere de una atención particular. La geometría no se encuentra contemplada por las normas de viento de aplicación como la UNIT 50:84 (1984) o la UNE-EN 1991-1-4 (2007). Este aspecto obliga a tomar ciertas simplificaciones y consideraciones para su aplicación, como se detallará en los siguientes párrafos.

3.1. Coeficientes de presión exterior

En este punto, el objetivo fue obtener los coeficientes de presión exterior en la cubierta para cada dirección de viento, partiendo de 0° perpendicular al lado recto y aumentando de a 45° en sentido horario —como se muestra en la Figura 4.a—.

Para ello, en primer lugar, se discretizó la estructura en 18 elementos, utilizando como referencia la ubicación de los pórticos. En cada elemento se tomaron tres valores de ángulos: α_1 , α_2 y α_3 (Figura 4.b). Obtenidos los parámetros α_1 , α_2 y α_3 para cada elemento, se procedió a aplicar la Tabla 7.3a y 7.3b de la norma EN 1991-1-2 (2007), analizando las situaciones de viento según las direcciones locales de cada elemento (Figura 4.c). Cabe destacar que para las direcciones 90° y 270° el elemento se divide en dos zonas: una superior con inclinación α_2 y otra inferior con inclinación α_3 . En caso de que el valor α_2 o α_3 fuera menor a 5° , se consideró, para ese sector, y para las direcciones 90° y 270° , que la cubierta era plana. Este aspecto implicó que en estos casos se aplicara la Tabla 7.3b con α_1 como único parámetro de entrada.

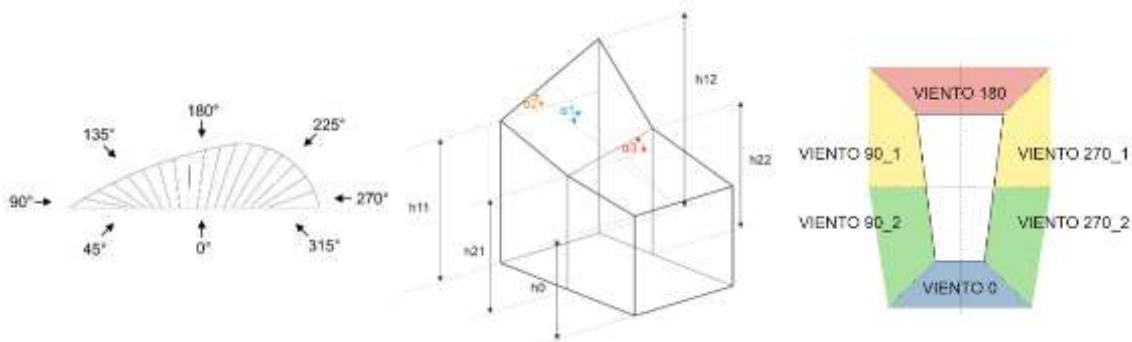


Figura 4: a) Direcciones globales de viento; b) parámetros angulares de cada elemento; y c) mapa de ubicación de direcciones locales de viento

Para cada elemento y cada dirección local de viento (Figura 4.c) se obtuvieron los coeficientes F, G, H e I —según la Figura 7.7 de la UNE-EN 1991-1-4 (2007)—. Luego, fijada una dirección global de viento, y dependiendo de la orientación de cada elemento en la estructura, se puede convertir dicha dirección global en una dirección local particular. Esto permitió obtener, para cada elemento, los coeficientes F, G, H e I asociados a cada dirección global (Figura 4.a)

El coeficiente I se obtuvo solo en aquellos casos en los que α_2 o α_3 resultaron menores a 5° . Esta situación se da en tres elementos, por lo que, a modo de simplificación y del lado de la seguridad, no se tuvo en cuenta el coeficiente I. En todos los casos se adoptó el coeficiente H como el correspondiente a presión exterior general. Por otra parte, para localizar la zona de aplicación de los coeficientes de borde F y G, se evaluó dimensionalmente a la estructura completa respecto a las direcciones globales de viento. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la localización de los efectos de borde para la dirección de viento 135° . El ancho de influencia de la zona F-G es de aproximadamente 3 m.

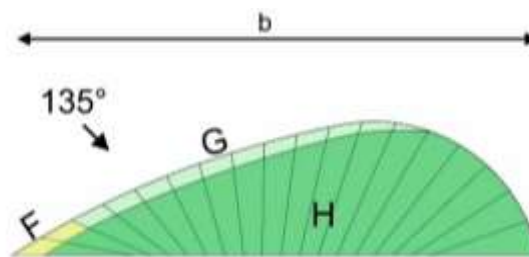


Figura 5: Localización de la zona de borde para el caso de viento 135°

Los coeficientes de presión exterior en fachada se determinaron siguiendo un razonamiento análogo al anterior: se evaluó para cada dirección global la orientación de la fachada de cada elemento y se calcularon los coeficientes asociados según la norma UNE-EN 1991-1-4 (2007).

3.2. Coeficientes de presión interna y totales

Los coeficientes de presión interna se calcularon de acuerdo al apartado 7.2.9 de la norma UNE-EN 1991-1-4 (2007). De forma conservadora se consideró al coeficiente de presión interna como el 90% del coeficiente de presión externa en los huecos de fachada, teniendo en cuenta que el 90% de los huecos se encuentran en la fachada frontal. Finalmente, se obtuvieron los coeficientes totales combinando los coeficientes de presión interior y exterior. Este método de cálculo dio lugar a una distribución de cargas compleja, tal cual se muestra en la Figura 8.



4. METODOLOGÍA DE MODELADO PROPUESTA

El proceso de diseño de una estructura incluye varias etapas, que varían ligeramente de acuerdo a distintos autores (Pahl and Beitz 1988; Ertas and Jones 1996; Dym and Little 2009). Según Dym and Little (2009), estas fases son: a) definición del problema; b) diseño conceptual; c) diseño preliminar; d) diseño detallado; y e) comunicación del diseño. Dentro del diseño detallado, el modelado numérico de la estructura —o análisis estructural asistido por computadora— se ha vuelto un paso casi ineludible en estos tiempos. Este capítulo se centra en el proceso de modelado estructural y en las metodologías disponibles para tal fin.

4.1. Metodología tradicional: SAP2000

La forma más habitual de modelar una estructura es a través de un *software* de análisis y diseño estructural, que permite la creación de un modelo basado en el método de elementos finitos (MEF) a través de una interfaz gráfica. Algunos ejemplos de programas comúnmente utilizados son el SAP2000 (Computers and Structures), el Robot Structural Analysis Professional (Autodesk) y el CYPECAD o CYPE 3D (CYPE Ingenieros).

El SAP2000 es un *software* de modelado, análisis y dimensionado de variadas estructuras, como edificios, estadios, torres, plantas industriales, represas, entre otras (Computers and Structures, Inc. 2017). A través de su interfaz gráfica es posible crear un modelo tridimensional de una estructura y luego analizarla mediante el MEF. Algunos de los estudios que se pueden realizar son: análisis estáticos y dinámicos (*modal*, *time-history*, *power-spectral-density*, entre otros), análisis lineales y no lineales (incluyendo no linealidades geométricas), análisis en el tiempo (por ejemplo, construcción por etapas o efectos de fluencia y retracción).

La relativa sencillez de su interfaz gráfica (que permite un modelado rápido y una visualización directa de los resultados) y la versatilidad para realizar diversos tipos de análisis en variadas estructuras lo convierten en uno de los *softwares* más utilizados por la industria en Uruguay. Es particularmente eficiente cuando se desea modelar estructuras geoméricamente sencillas —o importables desde otro programa de dibujo, como AutoCAD (Autodesk) o Revit (Autodesk)— y sometidos a cargas y condiciones de borde que puedan definirse de forma simple. Sin embargo, por sí solo, el SAP2000 presenta ciertas limitaciones cuando se trata de modelar estructuras que no reúnan estas condiciones, como en el caso del museo de este trabajo.

4.2. Metodología numérica: MATLAB

Una alternativa a la resolución mediante un *software* específico de análisis estructural es el cálculo (modelado) numérico con un lenguaje de programación, generalmente utilizando un entorno de desarrollo integrado. Algunos ejemplos de programas de análisis numérico con lenguajes propios son: MATLAB (MathWorks) y Mathematica (Wolfram Research). También es posible utilizar un lenguaje específico (como Fortran o Python) a través de un compilador.

Ampliamente utilizado en el ámbito científico, el MATLAB es un *software* matemático que permite la manipulación directa de vectores y matrices, la visualización de funciones y datos, la implementación de algoritmos, y la creación de interfaces de usuario, entre otras capacidades. El lenguaje de programación propio es muy fácil de aprender, y da lugar a algoritmos sencillos y cortos en comparación a otros lenguajes (Kwon and Bang 1997).

Por ser un *software* matemático, es necesario plantear el problema de forma numérica, de forma que pueda ser resuelto mediante el MEF. De forma resumida, este proceso supone los siguientes pasos (Reddy 2005): a) representación y mallado del dominio; b) formulación simplificada del problema en los elementos finitos; c) ensamblaje de las ecuaciones de los elementos; d) imposición de las condiciones de contorno; y e) resolución e interpolación de la solución.



El procedimiento descrito debe realizarse para cada análisis particular que se desee realizar: este aspecto provoca que la metodología numérica de modelado sea extremadamente laboriosa y, por tanto, poco eficiente a nivel profesional. No obstante, presenta algunas ventajas en comparación a la metodología tradicional: el modelado y análisis es más transparente, en el sentido que se conoce más en profundidad el funcionamiento interno del *software*; es más flexible pues es posible introducir cualquier tipo de estructura (por ejemplo, de geometría o rigidez variable) y realizar cualquier tipo de análisis estructural; y, por último, suele ser más adaptable, ya que los pasos se pueden programar (por ejemplo, el mallado), por lo que no es necesario rehacer manualmente todo el modelo si cambian los datos de entrada.

4.3. Metodología propuesta: combinación de los *softwares*

De las metodologías presentadas se desprende que ninguna de ellas es particularmente adecuada (o conveniente) para el modelado de estructuras complejas (como la del museo), ya sea por su geometría (Capítulo 2) o por las características de sus cargas (Capítulo 3). Es, así, necesario usar una metodología distinta, que viabilice el modelado de este tipo de estructuras. Para ello, en este trabajo se propone la aplicación conjunta de dos *softwares*: el SAP2000 y el MATLAB.

El SAP2000 almacena los datos del modelo y otra información en una base de datos compuesta por tablas. Estas tablas se pueden editar directamente a través de una herramienta llamada *Interactive database editing* (Computers and Structures, Inc. 2017), que permite añadir o modificar todos los parámetros que definen un modelo (como los materiales, las secciones, la geometría, la conectividad de los elementos, las condiciones de borde, las cargas, etc.). A su vez, una vez realizado el análisis, el *software* dispone de otra herramienta, llamada *Show Tables* (Computers and Structures, Inc. 2017), que permite obtener tabulados todos los resultados del análisis (como, por ejemplo, los desplazamientos y las solicitaciones).

La idea detrás de esta metodología es utilizar el SAP2000 para modelar y analizar la estructura compleja, pero generar en MATLAB aquellos aspectos del modelo que, por su complejidad, no puedan realizarse fácil y directamente en el primero. De esta manera se aprovechan las ventajas de cada una de las metodologías: el SAP2000 sirve como software de análisis, con una potente interfaz gráfica (que permite modelar ciertas partes de la estructura y luego visualizar de forma directa los resultados); y el MATLAB sirve como herramienta matemática para elaborar, con flexibilidad, los aspectos más difíciles del modelo (como partes de la geometría, el mallado o las cargas), y para luego analizar y dimensionar la estructura a partir de los resultados numéricos.

4.4. Aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio

Como ejemplo de la metodología combinada propuesta, en este punto se presenta cómo se aplicó a la estructura de madera del Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay.

4.4.1. Particularidades de la estructura

Los recaudos gráficos que sirvieron como punto de partida del modelo fueron una planta con la disposición de los pórticos (Figura 2), y un alzado de cada uno de ellos (Figura 3). Los pórticos están formados por pilares dobles rectos y vigas simples de curvatura y sección variable. Por otra parte, luego de un proceso de optimización, se dispusieron las correas en planta, tal cual se muestra en la Figura 2. La cubierta, sobre la que actúan las acciones de viento, queda entonces definida por la cara superior de las vigas y de las correas. Luego de un análisis simplificado, tal cual se presentó en el Capítulo 3, se obtuvieron unas presiones de viento variables para cada dirección de viento considerada. De estos comentarios se desprenden cuáles fueron las principales dificultades para modelar la estructura:



- las vigas son de curvatura y sección variable;
- las correas están definidas en planta, pero no en el espacio;
- las acciones de viento están aplicadas de forma distribuida no son uniformes a lo largo y ancho de la cubierta.

4.4.2. Metodología aplicada

El proceso de modelado de la estructura comenzó con la obtención, desde AutoCAD, de la geometría de los pórticos: esto es, los ejes de los pilares y las curvas superiores de las vigas (que definen la cubierta). Por otra parte, se diseñó en MATLAB una función que, para cada viga, define la altura de la sección de esta en función de la posición horizontal relativa a la viga. De esta función y de las curvas superiores de las vigas, se obtuvieron las curvas que pasan por los baricentros de las secciones de las vigas —mediante un algoritmo de MATLAB—.

Habiendo obtenido en MATLAB la geometría de los pilares y las vigas, se importó desde AutoCAD la posición en el plano de las correas. Mediante otro *script* de MATLAB, estas se proyectaron a los pórticos (a los ejes de las vigas curvas), de manera de posicionarlas en el espacio. Se obtuvieron las coordenadas de los puntos intersección entre las correas y las vigas, y se agregaron otros puntos en las vigas, de manera que no quedaran tramos de más de 25 cm. Este procedimiento dio lugar a una serie de nodos conectados por elementos de barra.

A partir de la información antes obtenida, se generó en MATLAB una matriz de 2194 nodos, una matriz de 2511 elementos de barra (*frames*), y una matriz de conectividad asociada. La matriz de nodos contiene una lista de puntos con la siguiente información: un índice (que indica el nodo en particular) y tres coordenadas (x, y, y z, definidas de forma global). La matriz de *frames* contiene una lista de los elementos de barra y de las secciones asociadas (previamente definidas en el SAP2000). Por último, la matriz de conectividad contiene la misma lista de elementos de barra, pero con otra información: un índice (que indica el *frame* en particular), y dos puntos, que representan aquellos nodos que cada elemento une.

Una vez generadas estas tres tablas (matrices en MATLAB), estas se pueden importar desde SAP2000 mediante la herramienta definida en el Punto 4.3. Para ello, primero es necesario definir los materiales (ortótropos, en el caso de la madera), y luego se generar las secciones que se emplearon en la matriz de *frames*. Entonces es posible importar la geometría generada en MATLAB y agregar elementos adicionales (como los tensores) o definir las condiciones de contorno (apoyos fijos en las vigas y los pilares). De esta forma queda definida la estructura de madera: en la Figura 6 se muestra una imagen tridimensional del modelo en este punto.

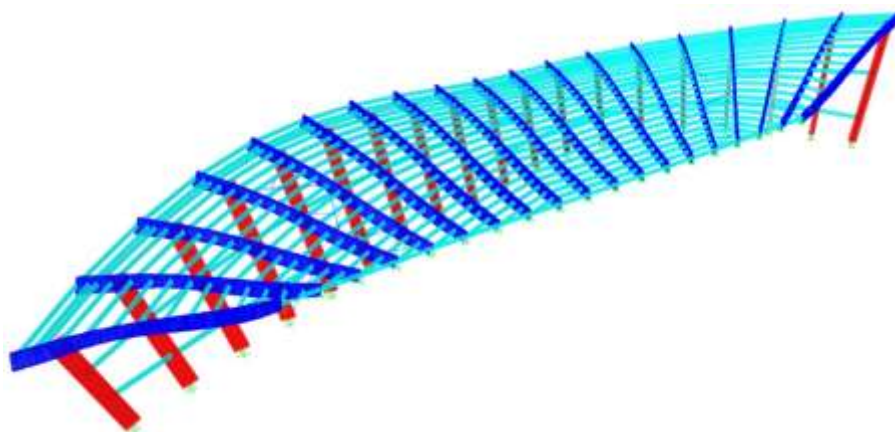


Figura 6: Imagen tridimensional del modelo una vez definida la geometría; en rojo se representan a los pilares, en azul a las vigas, y en celeste a las correas



La siguiente gran dificultad del modelo computacional fue la introducción de las acciones de viento, presentadas en el Capítulo 3. Por tratarse de cargas distribuidas, existen básicamente dos formas de acoplarlas al modelo: a) asignando cargas uniformemente distribuidas a los *frames*; o b) generando una cubierta ficticia mediante elementos de losa (*shell*) y asignando las presiones a los elementos de losa. Cada una de las opciones presenta algunas ventajas y otras dificultades.

En el caso de estudio, se decidió generar una cubierta mediante *shells*. La ventaja de esta opción es que las presiones se aplican directamente sobre estos elementos, para lo cual basta con conocer la dirección del viento y la posición en la cubierta. La principal dificultad es que, como la cubierta es de doble curvatura, normalmente no ocurre que cuatro puntos “cercaños” estén contenidos en el mismo plano. Por lo tanto, el mallado se debe realizar de forma numérica en MATLAB, y todos los elementos que deben ser triangulares (definidos por tres nodos).

El procedimiento seguido en MATLAB en este caso fue similar (aunque un tanto más laborioso) al presentado para la geometría. Mediante varias funciones y *scripts* se generó una matriz de 11973 nodos, una matriz de 19763 elementos de área (*shells*), y una matriz de conectividad. Aquí, la matriz de conectividad vincula a tres nodos por elemento. Estas tablas se importaron desde SAP2000 (luego de definir la sección de los *shells*) y se obtuvo la geometría final del modelo, tal como se muestra en la Figura 7.

El siguiente paso fue generar una tabla de presiones sobre los elementos de área. Para ello se creó —en MATLAB— una matriz con la siguiente información: una columna con los índices (que indican los *shells* en particular), otra columna con los nombres de los “*Load Patterns*” asociados a las direcciones de viento, y una tercera columna con los valores —que indican los coeficientes de presión total obtenidos mediante interpolación— para cada combinación de elementos de área y direcciones de viento (Figura 8).

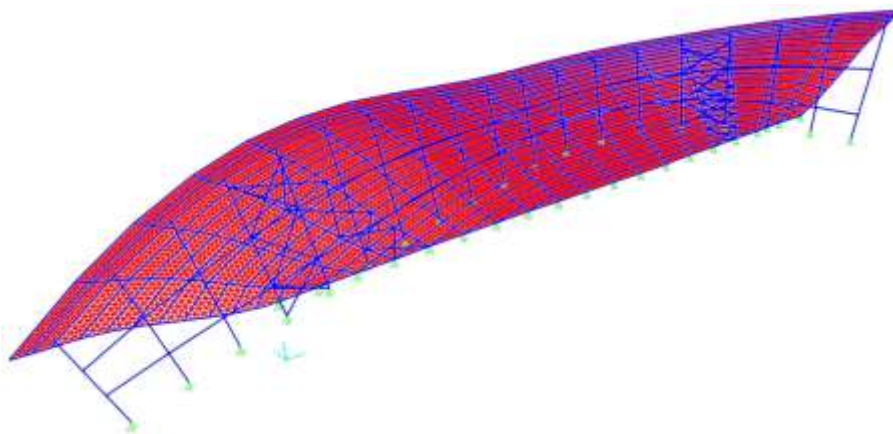


Figura 7: Imagen tridimensional del modelo una vez definidos los elementos de área

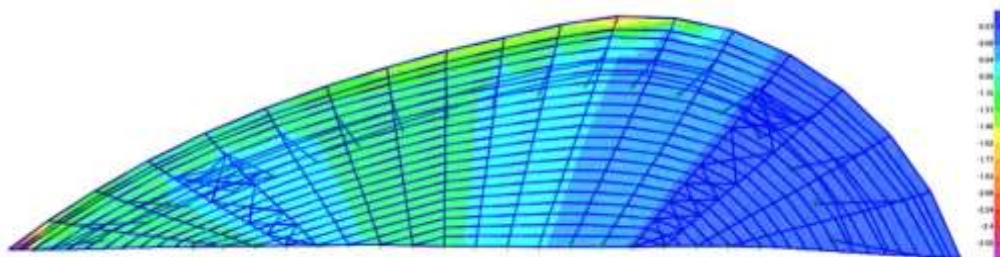


Figura 8: Asignación de presiones de viento a los elementos de área para el caso de viento 135° (1); los valores indican coeficientes de presión total



4.4.3. Resultados obtenidos: modelo numérico

El resultado de aplicar la metodología propuesta a la cubierta del museo fue la obtención de un modelo numérico tridimensional de la estructura. Este modelo se usará para analizar la estructura y para dimensionar los elementos que la conforman. En este proceso, también será de utilidad el MATLAB, ya que la utilización sinérgica de los dos *softwares* no está restringida al proceso de modelado: también aplica a la verificación y diseño de la estructura.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas —de madera— mediante un caso de estudio sin precedentes en el Uruguay: la cubierta del Museo de Arte Latinoamericano. La metodología, que consiste en la utilización sinérgica de dos *softwares* (SAP2000 y MATLAB), posibilita la modelización y el análisis de estructuras como la del museo, que, ya sea por la complejidad de su geometría, por la dificultad en la introducción de las cargas o por otra particularidad, hagan inviable el modelado directo a partir de la utilización de un solo único *software* (como ocurre en la práctica).

Para algunos autores, estamos en el comienzo de una “era” de madera. La humanidad es cada vez más consciente de las virtudes ambientales de construir con este material y, paulatinamente, va descartando algunos de los prejuicios hacia la madera. Este proceso ha sido acompañado por un gran avance tecnológico en el desarrollo de productos de ingeniería de madera y por una capacidad creativa cada vez mayor de quienes diseñan estructuras. Para que este proceso continúe, debe acompañarse de métodos —así como de profesionales e investigadores— capaces de hacer frente a las nuevas y desafiantes demandas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baño V., and Moya L. (2018). Curriculum development of postgraduate studies on timber construction for architects and engineers. In: Engineering a better world: sustainable development of agricultural and forestry systems. International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences, Montevideo, Uruguay.

Computers and Structures, Inc. (2017). CSI Analysis Reference Manual: For SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge. CSI, Berkeley, USA.

Dangel U. (2016) Turning Point in Timber Construction: New Economy. Birkhäuser, Basel, Switzerland.

Dym C.L., and Little, P. (2009). Engineering Design. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.

Ertas A., and Jones J. (1996). The Engineering Design Process. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.

Kwon Y.W., and Bang H. (1997). The Finite Element Method using MATLAB. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Natterer J. (2004). A way to sustainable architecture by new technologies for engineered timber structures. In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2004), Finland.

Pahl G and Beitz W. (1988). Engineering Design: a systematic approach. Design Council, London, UK.

Reddy J.N. (2005). An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill, New York, USA.

UNE-EN 1991-1-1. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento. AENOR, Madrid, Spain.

UNIT 50:84. Acción del viento sobre construcciones (1984). UNIT, Montevideo, Uruguay.