

# DISEÑO ESTRUCTURAL A PARTIR DE LA GENERACION GEOMETRICA

## Medios digitales y estrategias de proyecto

Arq. María del Carmen Fernández Saiz<sup>1</sup>, Prof. Titular Estructuras IV, Prof. Adjunta Especialidad Estructuras Arquitectura VI A y B  
Ing. Cecilia Nicasio<sup>2</sup>, Prof. Adjunta Especialidad Estructuras Arquitectura VI C y D  
Arq. Federico Urfer, Adscripto Egresado Estructuras IV  
Taller de Investigación y Diseño Estructural, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, U N C. Córdoba, Argentina

### RESUMEN

La geometría ha sido siempre uno de los instrumentos que guía el proceso de diseño del arquitecto, y en él la estructura colabora aportando sus consideraciones formales y compositivas, como eje fundamental de la forma arquitectónica.

En la actualidad, las tecnologías digitales de análisis, diseño y construcción ha generado una situación arquitectónica sin precedentes, en la que prácticamente cualquier planteamiento formal puede ser resuelto y construido, propiciando el desarrollo de la llamada arquitectura de formas libres. En este contexto, surgen nuevas estrategias proyectuales, como recurso significativo en la generación de la forma estructural capaz de desempeñar un rol fundamental en la propuesta arquitectónica, con el planteo de diversas alternativas morfológico - estructurales, y su evaluación en relación a la eficiencia estructural.

El presente trabajo pretende indagar cómo han influido los medios digitales en la concepción del proyecto, con énfasis en los aspectos estructurales y tecnológicos, considerados de manera integral, y las posibilidades que brindan estas herramientas de diseño, evaluando su aplicación en relación a diferentes respuestas estructurales.

Se abordará el tema a través de lo realizado por alumnos de las cátedras de arquitectura VI, como parte de su trabajo final, última etapa de su formación académica, y en el cual se desarrolla el proceso de diseño integralmente, desde las diferentes condicionantes programáticas y tecnológicas.

Los ejemplos referidos evidencian dos maneras complementarias de utilizar los software: en un principio para la generación de la forma proyectual tanto del conjunto como de cada detalle, y luego para la representación de la misma, según normas prefijadas, que permitan su construcción y/o montaje, donde arquitectura y construcción se presentan juntas, tanto en el proceso de diseño y producción como en el resultado visual final.

---

<sup>1</sup> Correo electrónico de contacto: María del Carmen Fernández Saiz, [mfernandezsaiz@yahoo.com.ar](mailto:mfernandezsaiz@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup> Prof. Adjunta de Representación asistida. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC.

## **INTRODUCCIÓN**

Generalmente los programas de diseño por computadora se han utilizado como una herramienta para poder visualizar los espacios y los edificios diseñados antes de ser construidos, para tener una idea más clara de lo que se plantea y poder cambiar detalles o corregir errores.

El generar los proyectos por medio de diseño asistido por computadora ha liberado el proceso de diseño en el sentido de generación de objetos complejos como son las superficies topológicas pudiéndolos adaptar sutilmente a terrenos accidentados y a su entorno en general.

El diseño arquitectónico no se limita a la configuración de un espacio. Una obra de arquitectura envuelve muchos elementos: desde el encargo, el programa, el lugar, la estructura, hasta un método constructivo, que determinan a través de sus materiales y medidas, condiciones o restricciones al momento de desarrollar un proyecto.

En este contexto se ponen en discusión el proceso de desarrollo de las formas libres, el potencial de la arquitectura digital y el papel de la estructura en su desarrollo.

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación que venimos desarrollando en el Taller de Investigación y Diseño Estructural (TIDE). En él se indaga sobre los efectos que la utilización de las herramientas digitales tiene en la generación y evaluación de los aspectos estructurales y tecnológicos del proyecto, pero considerados de manera integral.

## **CONTEXTO**

Desde finales del siglo XX, se han producido significativos avances que han modificado los alcances y las posibilidades técnicas y constructivas, inclusive la propia manera de diseñar y proyectar.

La notable optimización de las propiedades y de las características de los materiales estructurales existentes, fundamentalmente en términos de calidad, resistencia, durabilidad, control y condiciones de puesta en obra, ha contribuido a ampliar sus posibilidades técnicas y constructivas.

Las tecnologías digitales ofrecen posibilidades geométricas y espaciales anteriormente imposibles de representar y realizar, superando el paradigma modernista de normalización hacia lo no estandarizado, y permiten investigar sistemas complejos, explorando múltiples posibilidades formales. Es posible además examinar rápidamente muchas variaciones del mismo sistema con el fin de generar una rápida retroalimentación dentro del proceso de diseño, convirtiéndolo en un proceso evolutivo integrador, para luego producir toda la documentación técnica necesaria para la materialización del proyecto arquitectónico.

La utilización de programas computacionales permite primero generar y luego analizar gráficamente el comportamiento de las estructuras en el espacio. Para el diseño de las geometrías complejas, los software constituyen una manera de dotar de rigor y coherencia las formas libres, evitando situaciones de total independencia entre geometría y estructura de sostén.



La búsqueda formal a partir del software ha permitido recrear la imagen inicial, evidenciando la disociación entre la estructura oculta y la envolvente que define el lenguaje del proyecto (Figura 2).

Geoméricamente se propone una cubierta con cuatro ejes de simetría, cuya estructura principal está conformada por la rotación de ménsulas reticuladas de altura variable, sobre las que se apoyan los paneles plegados que conforman la piel estructural (Figura 2). Estos elementos están definidos por una serie de piezas diferentes que se repiten por octavos, como se muestra en la lámina (Figura 3).

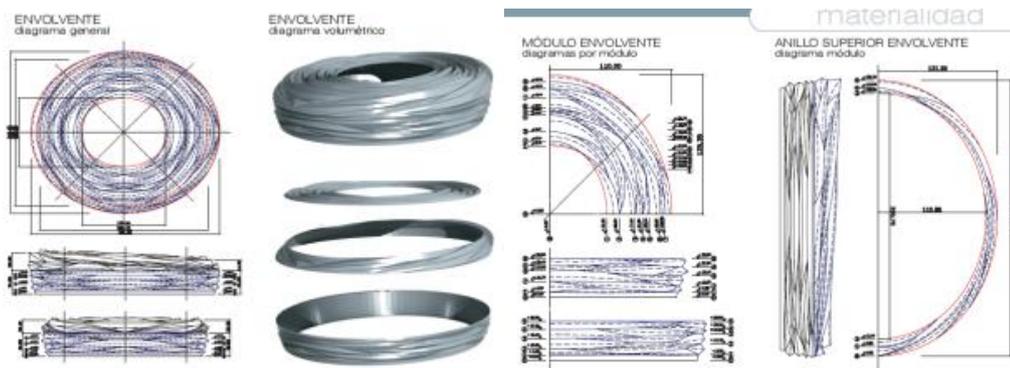


Figura 3. Estadio en Bs. As. Geometría y Materialidad.

Las técnicas digitales de diseño presentan la posibilidad de generar elementos variables, lo que ha permitido incorporar el concepto de la personalización en la materialización del proyecto. Esta personalización depende de las posibilidades de fabricación digital de elementos variables, por ejemplo, si se trabaja a través de una serie de paneles cuya forma debe responder a superficies que varían, la forma de relacionarse entre las partes o de montaje puede ser la misma, pero el tamaño de cada panel, su forma y ubicación es siempre distinta (Figura 3).

### Formas de generación estructural algorítmica

Este modo de diseñar implica el conocimiento de la generación de la forma a partir de la geometría, en donde se conjugan leyes geométricas y compositivas, y técnicas propias del diseño computacional por medio de software específicos de diseño.

En el proyecto de una pasarela peatonal en la ciudad de Valparaíso, surge una primera aproximación conceptual en la búsqueda de la geometría y las condicionantes topográficas (Figura 4).

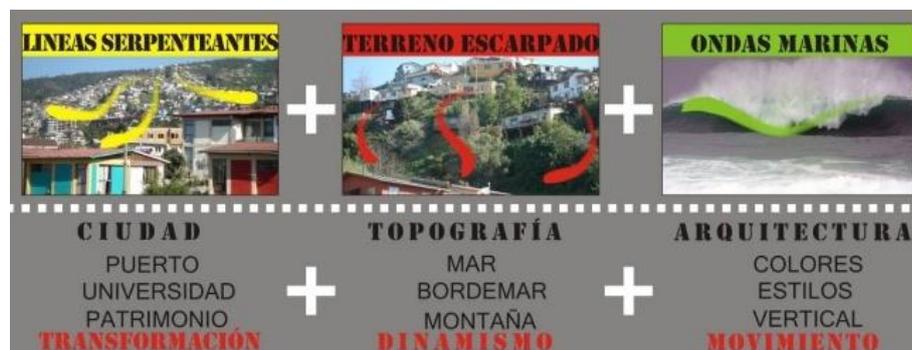


Figura 4. Pasarela Peatonal en Valparaíso. Ideas en relación al entorno

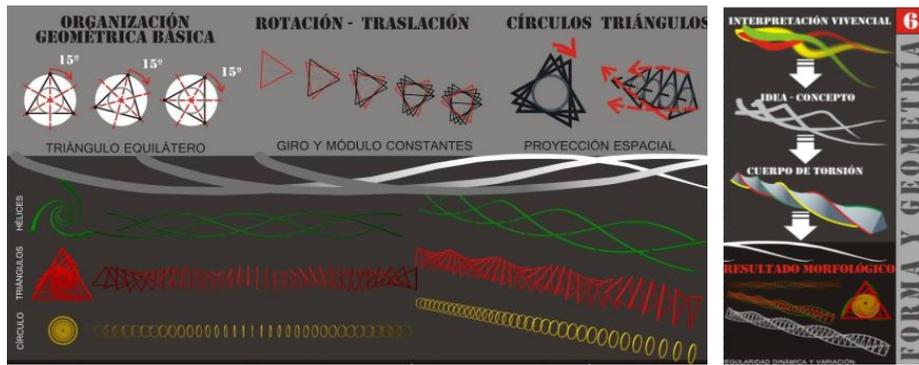


Figura 5. Pasarela Peatonal. Estudios de generación geométrica y proceso de diseño

La geometría está generada a partir de la rotación y traslación de un triángulo a lo largo de un eje longitudinal, tal como se grafica en los esquemas explicativos en 3d (Figura 5). Las herramientas computacionales permiten no sólo generar la forma sino visualizarla espacialmente y realizar los ajustes necesarios con celeridad y en tiempo real, siendo ésta una de las ventajas de los modelos virtuales frente a maquetas reales. El interés del proyecto reside entonces no sólo en la forma resultante sino también en el proceso que la genera. La lámina de síntesis de la composición muestra la evolución del proyecto desde el concepto hasta la pieza completa (Figura 5).

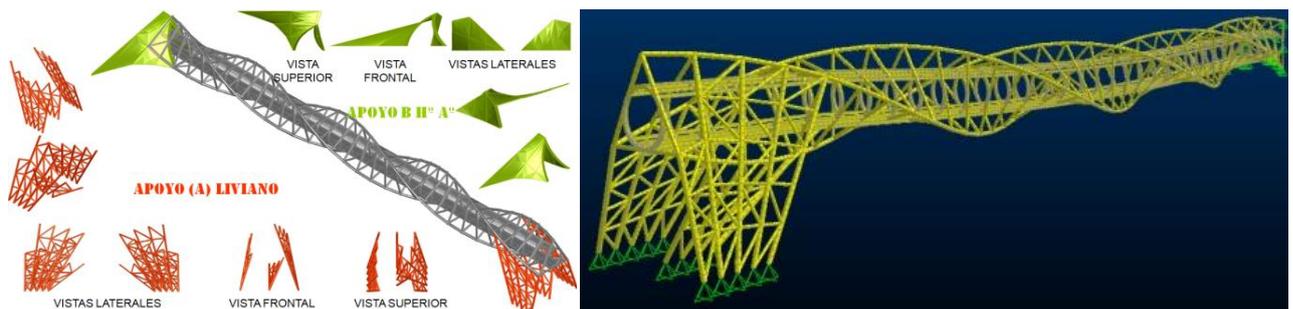


Figura 6. Pasarela en Valparaíso. Componentes y modelo estructural.

La estructura definida trabaja como una gran viga espacial de sección tubular, conformada por tres cordones en espiral que unen los vértices de los triángulos rotados (Figura 6).

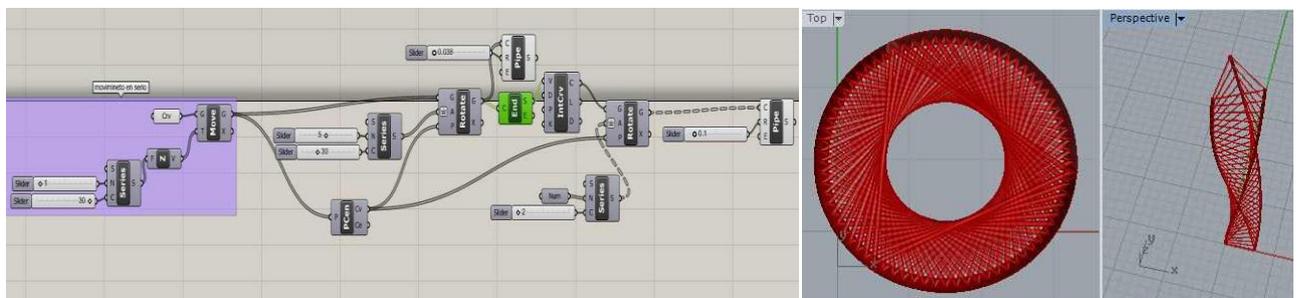


Figura 7. Algoritmo generativo. Vistas y perspectivas del modelo paramétrico

Las herramientas de diseño paramétrico también permiten la generación de la misma superficie a través de algoritmos definidos por variables, lo cual transforma al diseño

asistido tradicional en un modelo interactivo que, una vez definidos algunos parámetros, posibilita variaciones del resultado inicial en una continua búsqueda en la forma geométrica generadora (Figura 7).

La enorme ventaja de modelar la geometría a través de parámetros es la posibilidad de trasladar el algoritmo a cualquier geometría base, en este caso particular se partió de la transformación de un triángulo, pero se puede trasladar a cualquier figura geométrica, por ejemplo un pentágono o un cuadrado, generando una geometría particular en cada caso con diferentes respuestas formales (Figura 8).

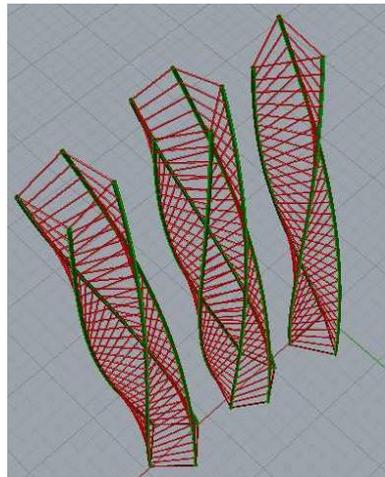


Figura 8. Pasarela con superficie base hexágono y triángulo.

### Formas adaptadas al comportamiento estructural

La estructura optimizada encuentra en leyes físicas y en la naturaleza de los esfuerzos el argumento para definir la configuración del proyecto.

El Concurso Parque Laguna de Venecia es un trabajo cuyo proceso de diseño surge a partir de las primeras ideas de Gaudí, sobre el funicular de las cargas, transferidas a métodos y modelos actuales (Figura 9).



Figura 9. Concurso Parque Laguna de Venecia. Definición conceptual.

Hemos desarrollado en el TIDE un método propio de generar estructuras laminares de alta eficiencia, el Método de las Grandes Deformaciones (MGD), a partir de la deformación simulada de una lámina plana, mediante la utilización de software específicos como herramientas de diseño estructural, que posibilitan la obtención de

formas complejas, en sucesivos ajustes de la geometría hasta obtener aquella estructura que resulte más eficiente en su comportamiento desde el punto de vista de deformaciones y tensiones límite (Figura 10).

El software Algor, creado para el análisis estático, se está utilizando para un fin no imaginado por sus autores y con excelentes resultados.

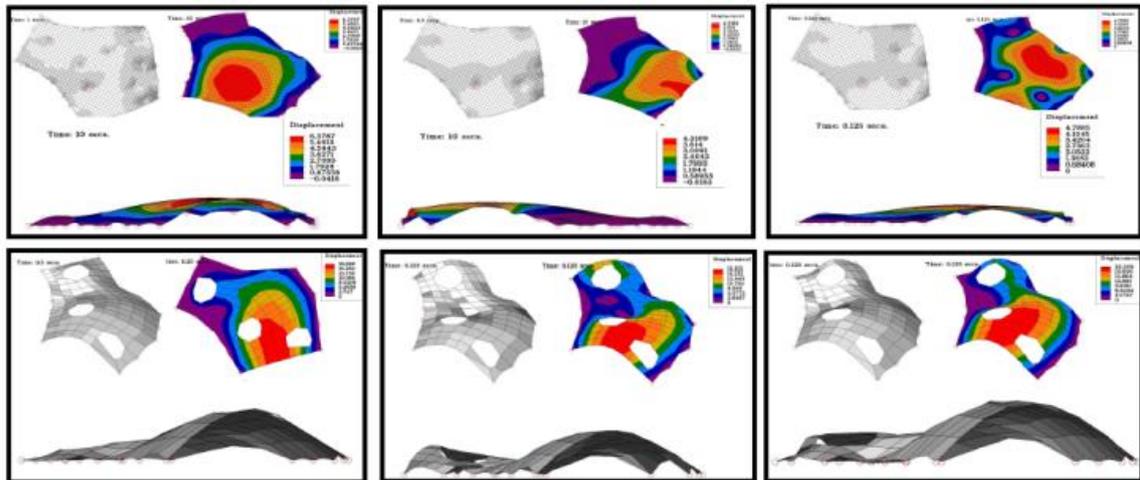


Figura 10. Concurso Parque Laguna de Venecia. Generación de la forma por MGD.

### Formas de diseño paramétrico

Los programas para modelado tridimensional permiten experimentar con formas generadas a partir de un conjunto de parámetros diversos que, combinados y relacionados, definen desarrollos formales maleables. Esto da como consecuencia la creación de de formas libres y orgánicas dentro de la propuesta arquitectónica.

#### Módulo estructural

La idea estructural se basa principalmente en la de un módulo repetible inspirado directamente en la **lógica constructiva** de los fuselajes de las **aeronaves**, donde existe una **columna principal longitudinal**, y una sección transversal, compuesta por **costillas** que varían su forma y dimensiones; a lo largo de esta columna; de acuerdo a su solicitud estructural y funcional.

A pesar de que el módulo tiene independencia estructural, al combinarse con otros gana mucha rigidez para los esfuerzos horizontales y genera una morfología uniforme y orgánica

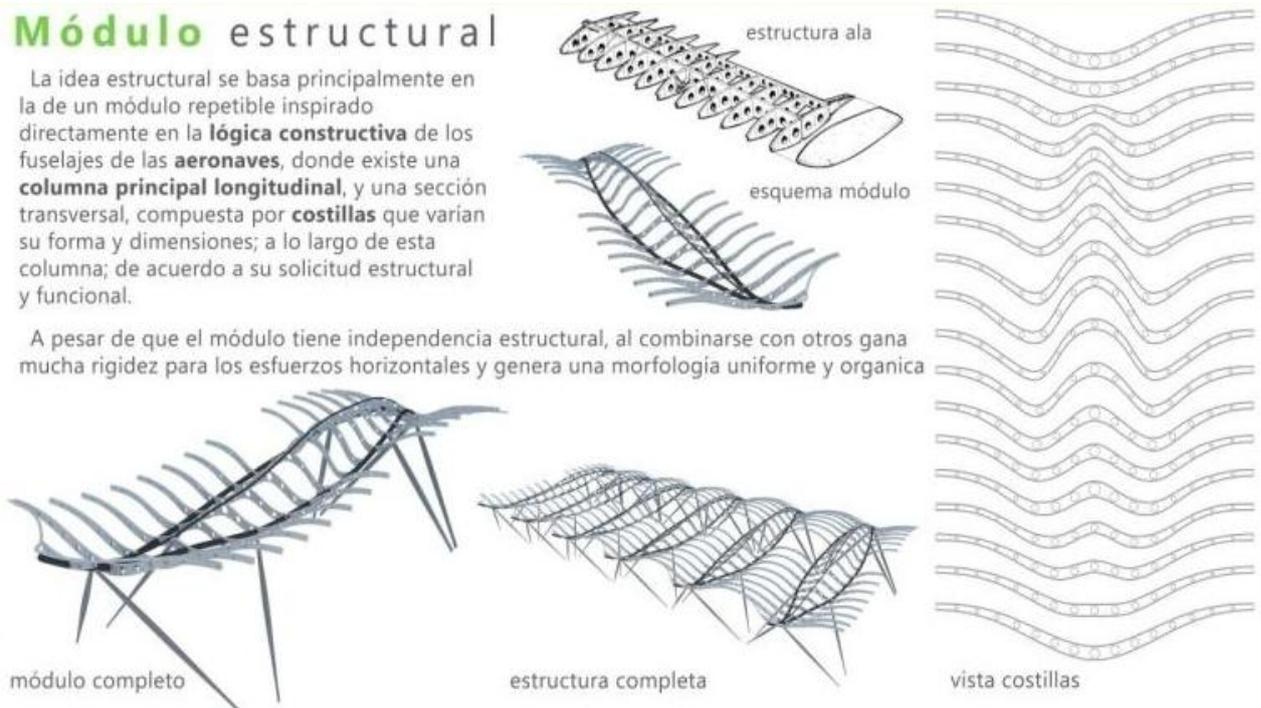


Figura 11. Aeropuerto Escuela de Aviación. Configuración estructural.

El diseño de la cubierta para el Aeropuerto Escuela de Aviación Córdoba se basa en un módulo repetible inspirado en la lógica constructiva de los fuselajes de los aviones, donde existe un eje o columna principal longitudinal a lo largo de la cual se desarrolla una sección transversal conformada por una sucesión costillas que van variando su geometría y altura como respuesta a las solicitaciones estructurales (Figura 11).

Esta estructura principal se completa con cuatro apoyos en V formados por tubos, de sección variable para mejorar su comportamiento a compresión, y que garantizan la estabilidad espacial del conjunto.

Cada módulo, al combinarse con otros, mejora el comportamiento estático, aumenta la eficiencia en el trabajo a flexión de las costillas y genera una morfología uniforme y orgánica. La estructura se representa en axonometrías y en secciones que muestren la variación geométrica de las costillas (Figura 11).

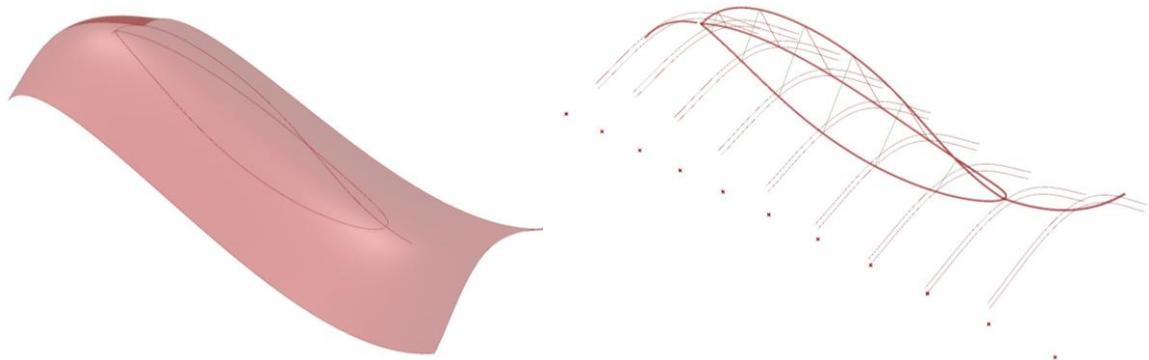


Figura 12. Superficie y ejes estructurales. Viga principal y secciones transversales

La geometría de la estructura ha sido generada con el software Rhinoceros, en un constante ejercicio de retroalimentación entre el diseño de la forma de la cubierta, y el de la estructura que la sostiene, ligando los dos elementos mediante parámetros con el plugin “Grasshopper”. El primer paso del proceso fue generar una superficie orgánica con dos curvas dibujadas en Rhinoceros. Luego se plantearon los ejes donde se vincularían cubierta y estructura, y se los relacionó mediante componentes variables del plugin (Figura 12). De esta manera, al realizar modificaciones en las curvas generadoras (por medio de sus puntos de control en el software), se puede observar simultáneamente el cambio en la superficie de la cubierta y también en la forma y dimensiones de la estructura; todo está ligado en una red de conectores que muestran el proceso paso a paso y permiten realizar ajustes y ver los resultados en tiempo real.

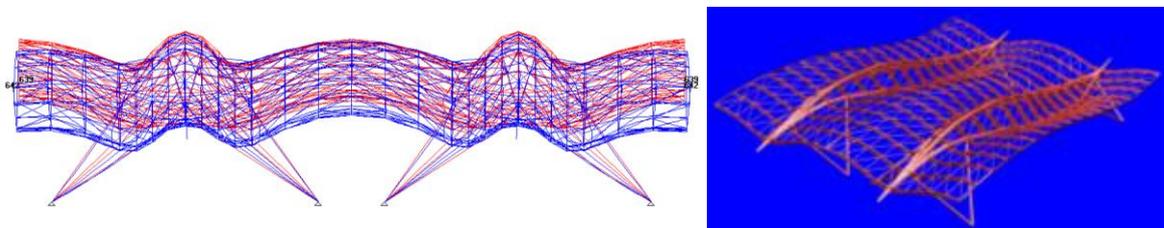


Figura 13. Aeropuerto Escuela de Aviación. Dos módulos. Descensos Máximos (STRAP)

Una vez definida la geometría, se utilizan software de cálculo que permiten interactuar con programas de dibujo, facilitando el modelado, a los fines de verificar la estructura y realizar los ajustes necesarios para un diseño más eficiente (Figura 13). Es importante en

esta etapa poner énfasis en lo conceptual específico del diseño estructural para una correcta modelación de la estructura.

La generación en el modelo virtual, se realizó relacionando los elementos por medio de componentes variables y modificadores numéricos, lo que permitió ajustes de la forma con la simple alteración del valor numérico asignado a cada uno, evitando tener que volver a dibujar pieza por pieza y permitiendo una ida y vuelta más dinámica.

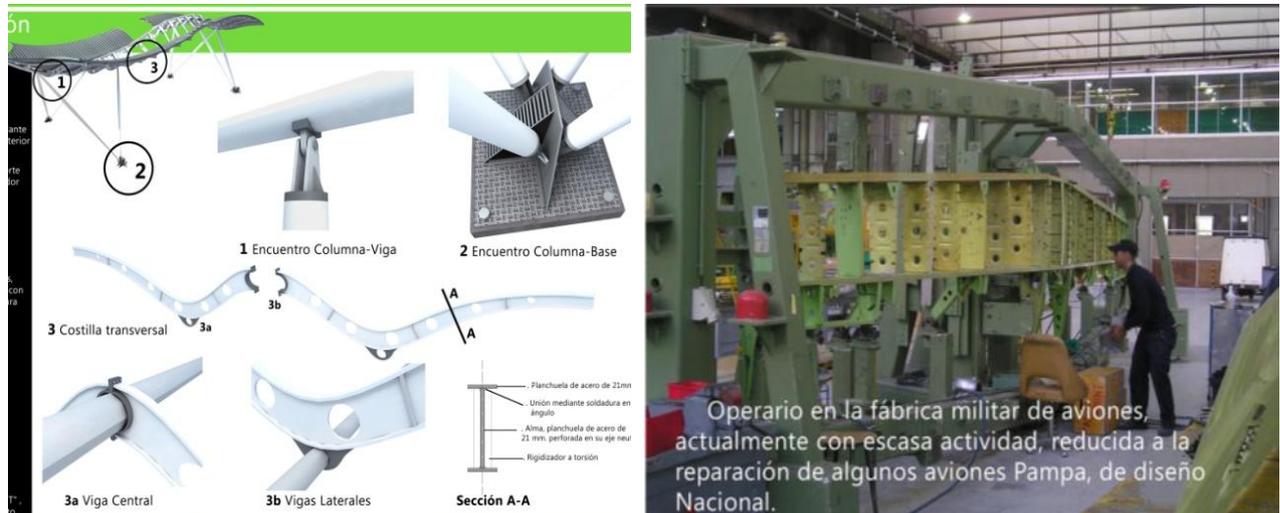


Figura 14. Detalle de Uniones. Sistemas de fabricación de la industria aeronáutica.

En los desarrollos, en los que se privilegia la libertad formal sobre la eficiencia constructiva, la generación de elementos variables, determina mayor complejidad en el proceso de construcción y de montaje y un mayor costo por el uso de uniones variables. Frente a este problema se propone generar un vínculo entre la arquitectura digital y la industria, utilizando las herramientas de diseño y producción digital en la generación de componentes. Se busca relacionar la variación de los componentes para aplicaciones específicas, con la incorporación del concepto de módulo, asociado a la repetición y combinación de los componentes (Figura 14).

Para el diseño de uniones se recurre al modelado a través de un software específico (Figura 14), que permite la preconcepción estos modelos, mediante la salida a archivos compatibles con equipos de control numérico.

Estas estrategias de diseño se caracterizan por una notable preocupación por los aspectos formales del proyecto, acordes con la imaginería visual digital actual. Se plantea, en este contexto, la cuestión sobre el papel que puede jugar la estructura como un parámetro más a introducir, o como el condicionante principal que rige y controla el desarrollo paramétrico del proyecto.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se pretendió explorar y conocer las reales posibilidades de los medios de diseño digital, y cómo su uso genera tanto libertades como restricciones al momento de diseñar, en el área del diseño estructural, el menos desarrollado de los aspectos inherentes al campo específico de las estructuras (diseño, análisis y tecnología).

Se ha mostrado, a través de los diferentes proyectos, distintos niveles con respecto a la utilización de las nuevas tecnologías digitales en lo que se refiere a la generación y

verificación del proceso, aparte de su lógico uso en planos de proyecto descriptivo y de ejecución. Estas herramientas de diseño se utilizan desde un punto de vista de la forma de representación convencional, pero también en el campo de la generación del diseño, a partir de diferentes combinaciones formales basadas en algoritmos computacionales o leyes físicas, con gran incidencia de las técnicas digitales en la definición del espacio.

Con respecto a la generación de estructuras optimizadas, es de destacar la importancia del desarrollo de un software de métodos de elementos finitos, concebido para analizar tensiones y graficar desplazamientos de la estructura, pero que se pueda utilizar también para generar la forma. El diseño conceptual a través del MGD permite generar estructuras de gran eficiencia utilizando una herramienta inicialmente pensada para otra finalidad.

Se ha demostrado el valor y la importancia de que tiene un algoritmo en la generación geométrica de estructuras y su potencialidad para poder mudarse a distintas geometrías bases, generando infinidad de posibilidades quizás no imaginadas en la mente del diseñador.

Los medios digitales más que una nueva forma de hacer arquitectura, permiten una mayor libertad formal en las condiciones de diseño, y facilitan la visualización, análisis y representación de cualquier posibilidad. Como herramientas de diseño constituyen un significativo aporte, subordinadas a la voluntad y capacidad creativa del diseñador.

A partir del análisis expuesto quedan planteados interrogantes sobre el potencial de la arquitectura digital y paramétrica en el proceso de desarrollo de las denominadas formas libres y el rol que desempeña la estructura.

Evidentemente esta tecnología abre un nuevo campo de aplicación a la arquitectura. En este contexto, nos preguntamos

- Es la estructura la que debe desempeñar el papel de orientar la libertad formal guiando su desarrollo en correspondencia las diferentes estrategias de diseño?
- Es la estructura el elemento esencial que relacione la arquitectura digital con la realidad tectónica y constructiva?
- Es la estructura capaz de otorgar una decisiva fuerza de expresión y coherencia a las formas libres?

## REFERENCIAS

- [1] M. KUBO, J. SALAZAR Y OTROS. (2004) Verb Matters. Editorial Actar.
- [2] M. MEREDITH, ARANDA - LASCH, M. SASAKI Y OTROS. (2008) From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture. Editorial Actar.
- [3] C. BALMOND. (2002) The Informal. Prestel Verlag.
- [4] D. MOISSET DE ESPANES (1997) Diseño de la forma de las estructuras laminares. Revista Ingeniería Estructural. Año 3 - Nro. 12 - Argentina. Publicación AIE
- [6] D. MOISSET DE ESPANES (1998) Diseño de estructuras laminares por computadora. XVI JAIE. Bs As, Argentina.

## AGRADECIMIENTOS

Equipo docente y alumnos de las Cátedras de Arquitectura 6, FAUD, UNC.