



MORFLEX: Sistema Morfoestructural Laminar Proyecto de Aplicación: Pabellón de la Amazonía

Roxana GARRIDO*, Jesús PEÑA*

Emy UYEJARA^a, Almendra MARAÑÓN^a, Mauricio RODRIGUEZ^a, José REATEGUI^b
Melissa GUIN^b, Astrid REYNA^b, Valeria PEÑA^d

*Profesor investigador, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Ricardo Palma
/ Instituto de Tensoestructuras de la Universidad Ricardo Palma "Roberto Machicao" - Perú /
Morfex Studio

Av. Benavides 5440 Lima - PERÚ

E-mail: morfex.jp@gmail.com – morfex.rgs@gmail.com

^a Asistente de Investigación, Instituto de Tensoestructuras de la Universidad Ricardo Palma
"Roberto Machicao" - Perú

^b Colaborador de Investigación, Instituto de Tensoestructuras de la Universidad Ricardo Palma
"Roberto Machicao" – Perú

^c Colaborador de investigación, Escuela de Medicina Veterinaria de la Universidad Ricardo Palma

Resumen

El sistema morfoestructural Morflex se sustenta en el principio de tensegridad laminar. Esta característica estructural se manifiesta en la disposición espacial de los componentes del sistema, que se complementan entre sí, a través de esfuerzos tracto-compresivos.

La propiedad principal del sistema Morflex es optimizar toda la configuración del conjunto, a partir de la disposición de sus componentes flexibles. La disposición cóncava-convexa, así como la distribución de los mismos permiten que los componentes liberen energía potencial que otorgan al sistema el equilibrio estructural requerido.

La aplicación del sistema Morflex para esta contribución, consiste en el diseño de un pabellón ligero de innovación estructural. La temática se inspira en la Selva Amazónica, con el fin de hacer una evocación a los habitantes y a la comunidad nacional e internacional, acerca de la preservación de esta región afectada gravemente, por la deforestación y la minería ilegal.

Palabras Clave: sistema morfoestructural, tensegridad laminar, estructura ligera, sinergia estructural, adaptabilidad formal y funcional, preservación de la Amazonía

1. Introducción

Las estructuras ligeras, dentro de las cuales están también las tensoestructuras, tienen como uno de sus ejes fundamentales, la búsqueda de la eficiencia en el diseño estructural. En nuestra cultura encontramos ejemplos que han trascendido en el tiempo y que manifiestan este principio de exploración a través de la forma resistente y eficiente, método que Frei Otto acuñó como *form finding* y que en nuestras antiguas civilizaciones ya se había desarrollado como efecto de su alta tecnología.

Uno de estos magníficos ejemplos en tensoestructuras, es el puente colgante Q'eswachaka, reconocido por la Unesco como **Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad**. Este proyecto de ingeniería de legado ancestral Inca, que sigue vigente desde hace siglos, integra el conocimiento y tradiciones de vida de ciertas comunidades en la sierra peruana. Su continuidad se debe a su carácter temporal que se renueva anualmente, gracias al uso de materiales naturales, como el ichu, especie de pasto utilizada como fibra que crece a más de 3000 m.s.n.m. La particularidad de este material es que en conjunto trabaja con el principio de torsión, al ser agrupados a manera de cables los cuales forman elementos suspendidos de gran escala que poseen una muy alta resistencia.



Fig. 01, 02, 03,04: Comunidad campesina del distrito de Qhehue -Cusco. Fotos varias

Referencia y antecedentes de investigación: Laboratorio de Tensoestructuras - Perú

El contexto de la presente investigación se desarrolla desde el “Taller de Escultura y Cerámica “Carlos Galarza” de la Universidad Ricardo Palma. Desde el año 2005 se han trabajado exploraciones que parten desde la premisa esencial del ahorro de recursos y de la eficiencia en el diseño de forma resistente. El interés por validar los aportes de nuestra cultura en función a la investigación de principios esenciales en el diseño y las estructuras ligeras, así como rescatar la visión de notables innovadores como los arquitectos Antoni Gaudí, Frei Otto, Buckminster Fuller entre otros; nos han conducido a desarrollar una serie de mecanismos de modelación y sistemas estructurales contextualizados a nuestra realidad. En esta ruta, los logros obtenidos a nivel de innovación, son el resultado de ensayar con una diversidad de materiales ligeros partiendo de la economía de recursos y la modelación de los mismos mediante el método *form finding*.

Dentro de las investigaciones desarrolladas, la más evolucionada es el Sistema Morflex, inicialmente resuelto en maquetas de láminas de cartulina simple como mecanismo y que posteriormente ha seguido evolucionando en prototipos de columnas, membranas, hasta convertirse en un sistema de modelación laminar de tracto- compresión aplicado a escala arquitectónica.

Una arista importante en la evolución considerable del sistema Morflex, caracterizado por la estandarización de sus componentes, fue el paso a la modelación paramétrica complementada con los

ciclos y producción del diseño asistido: CAD-CAM y CAE (desarrollándose en curso). Vale decir, que siendo un modelador que genera complejidad a partir de componentes simples; se precisaba contar con una herramienta de soporte digital para optimizar su uso en diversas escalas y aplicaciones.

De manera que las experiencias constructivas de elementos estructurales tales como columnas y membranas, toman en el proyecto Pabellón Amazonas una dimensión sistémica de unificación. Este paso permitió probar su flexibilidad constructiva en la exposición de la EXPO - IASS 2015 realizada en Ámsterdam, donde estimó conveniente explorar su construcción como sistema estructural laminar a escala arquitectónica.

En este campo de las tensoestructuras, tenemos en el Perú el aporte esencial y trascendente del Prof. Ing. Roberto Machicao y otros artífices importantes como el prof. Arq. Alberto Marroquín quien ha dejado un excelente legado de inspiración y motivación para las nuevas generaciones a través de su publicación digital “Guía básica de Tensoestructuras”. En cuanto al contexto internacional, la comunidad latinoamericana también ha venido sumado esfuerzos en la búsqueda de consolidar la popularización y el desarrollo de las tensoestructuras en la región. Producto de esta iniciativa, fue que en el año 2005 se fundó la Red Latinoamericana de Tensoestructuras - TENSORED, donde a la fecha los autores y su equipo de trabajo son miembros activos, junto con otros investigadores y profesionales de estos tópicos tales como el Prof. Arq. Carlos Henrique Hernández, Prof. Arq. Juan Gerardo Oliva, Prof. Ing. Ruy Marcelo Oliveira Pauletti, Prof. Arq. Jose Ignasi Llorens y a quien honorablemente recordamos el Arq. Felix Esgrid, entre otros.

2. MORFLEX: Sistema Morfoestructural Laminar

2.1. Principios del Sistema Morflex

Principio Morfológico: La complejidad es una expresión del orden

Partiendo de la teoría de simetría, donde la regularidad de sus operaciones emplaza la estructura de una composición, la dimensión de los fractales permite “percibir” que esa regularidad interactúa a diferentes escalas, generando composiciones complejas.

En tensoestructuras, esta visión abre una ruta de diseño morfológico, partiendo desde lo simple a lo complejo. En ese sentido, Morflex es un sistema morfoestructural laminar, configurado a manera de exoesqueleto, constituido por una superficie discontinua de láminas internas y externas, las cuales trabajan sinérgicamente para servir de soporte al conjunto estructural y brindando, como característica morfológica, una eficiente estabilidad morfo-estructural.

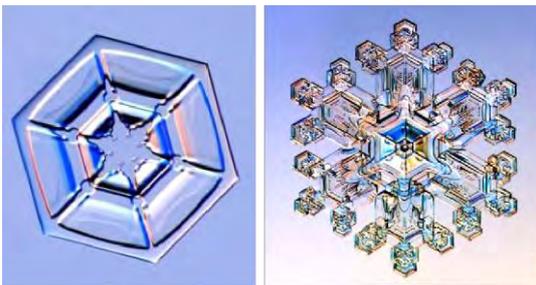


Fig 5, 6: Copos de nieve



Fig 7: Patrones Morflex: cuboctaedro y botella de Klein

2.1.2. Principio Estructural

El sistema Morflex se sustenta en el principio de tensegridad laminar. Su principal característica estructural, se manifiesta en su particular espacialidad de configuración, donde sus componentes, dispuestos estratégicamente, despliegan esfuerzos complementarios de tracto-compresión. Así como el citoesqueleto (red de fibras proteicas que ocupa el citoplasma de las células), mantiene la estructura y la forma de la célula a partir del concepto de Tensegridad o integridad tensional; el sistema se adapta y se estabiliza a partir de la secuencia de fuerzas y esfuerzos de tracto-compresión de sus componentes tal como lo hacen los microfilamentos y microtubulos de la célula.

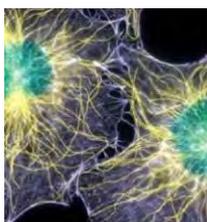


Fig 8: Citoesqueleto



Fig 9: Unidad básica:
Distribución concave-convexa



Fig 10, 11: Modelos Morflex (malla típica)

2.1.3. Principio de Adaptabilidad

La configuración de la materia dada a partir de patrones, puede manifestarse de la misma manera a diferentes escalas y en diferentes entidades fenomenológicas, así como en tiempos diferenciados, adquiriendo una diversidad de funciones a través del uso de un mismo patrón o identidad, el cual dependiendo de su dimensión y materialidad, puede ir transformándose “paramétricamente” hasta encontrar su forma más eficiente

Al constar de patrones regulares, el sistema Morflex logra configurar espacios y superficies en tramas poliédricas (arquimedianas), simples y dobles curvaturas hasta superficies complejas de orden topológico como la botella de Klein. Funcionalmente puede ser usado para generar rompecabezas, luminarias, instalaciones de arte, componentes arquitectónicos, etc.



Fig 12: Patrones Morflex

2.2. PROPUESTA: Morflex: Pabellón Amazonas

Temática

La actividad humana persistente en deteriorar y derrochar los recursos del planeta, los cuales incluyen el sector de la construcción que representa el 30% de la huella ecológica; así como los crecientes efectos del cambio climático, llevan a tomar conciencia del cuidado y preservación de las generaciones futuras. Fuentes de abastecimiento naturales, como los bosques de la Amazonía peruana, vienen siendo depredadas por la deforestación y minería informal. Lo cual conlleva, entre otras cosas, a la contaminación del agua y al desbalance del ecosistema tropical.

La propuesta de aplicación del sistema Morflex, hace uso de su espacialidad morfo-estructural para recrear un pabellón temático estacionario cuya configuración evoca el crecimiento de los árboles que albergan a las especies del bosque Amazónico. Los componentes estructurales representan a los actores de la sustentabilidad: la naturaleza, la sociedad y la economía, como sistema que deberá aprender a trabajar sinérgicamente para preservar el medio ambiente de nuestro planeta.



Fig 13: Testigos indefensos de la Selva Amazónica

2.2.2. Diseño de la Propuesta

La propuesta se configura en 3 columnas hiperbólicas que rematan en una superficie de curva parabólica (cubierta). El conjunto trabaja como una sola unidad a partir del armado de 2 tipos de componentes (interiores y exteriores).



Fig 14: Modelado analógico, maquetas y prototipos

Materiales: Los componentes lo constituyen láminas triangulares de los siguientes materiales

- Metálicos: El soporte de la estructura serán asumidos por piezas de acero, con el fin de absorber los esfuerzos propios de todos los componentes de la estructura.
- Polímeros: La parte intermedia o cuerpo de la estructura, es asumida por piezas de acrílico que van cambiando de espesor, conforme va aumentando la altura.

2.2.3. Proceso de ensamblaje:



Fig 15: Ensamblaje del primer prototipo de modelación analógica

2.2.4. Modelado Paramétrico: Optimización del Sistema Morflex:

Los primeros prototipos para el pabellón fueron diseñados de manera “bottom-up”, en la cual la geometría total era un resultado directo del ensamblaje de muchos elementos idénticos. Lógicamente, esta estrategia limita los posibles resultados a un número discreto de geometrías que se obtienen al variar el número de elementos empleados y su ubicación. Con este método habíamos llegado ya a una forma compleja e interesante para el pabellón, pero nos interesaba hacer pequeños ajustes en su geometría para lograr optimizar la distribución y flujo de cargas, y resolver problemas de curvatura y de transición geométrica entre la cúpula y las columnas.

Para lograr estas modificaciones en la forma del pabellón sin cambiar su topología, es necesario introducir variaciones en los elementos. Por ende, optamos por parametrizar el sistema, y esta vez diseñar de manera “top-down: tomamos control e incidimos directamente sobre la geometría total del pabellón, obteniendo luego como resultado la serie de elementos modificados que juntos conforman dicha geometría. Empezando con la geometría total a la que habíamos llegado manualmente (mediante modelos a escala y prototipos en escala real), modelamos digitalmente su forma simplificada como una superficie en Rhinoceros, y le hicimos modificaciones para optimizarla. Alteramos la silueta de las columnas ensanchando la base, reduciendo la sección de la parte media, e inclinando el capitel hacia afuera, para obtener una geometría más estable y continua. Adicionalmente, usando el plug-in Kangaroo para Grasshopper de Daniel Piker, simulamos una superficie catenaria invertida para la cúpula. Este

método de “form-finding” ayuda a optimizar la transferencia de cargas estructurales a través de la cúpula y hacia las columnas.

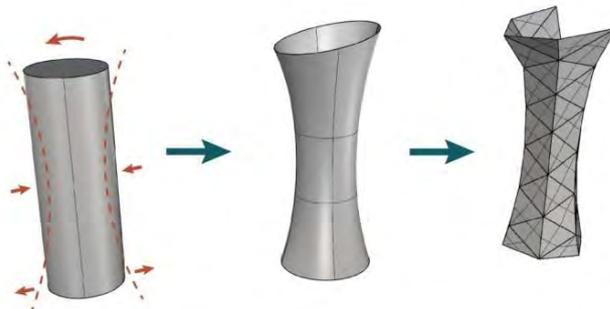


Fig 16: Modificaciones de la columna geométrica y generación de panelería triangular.

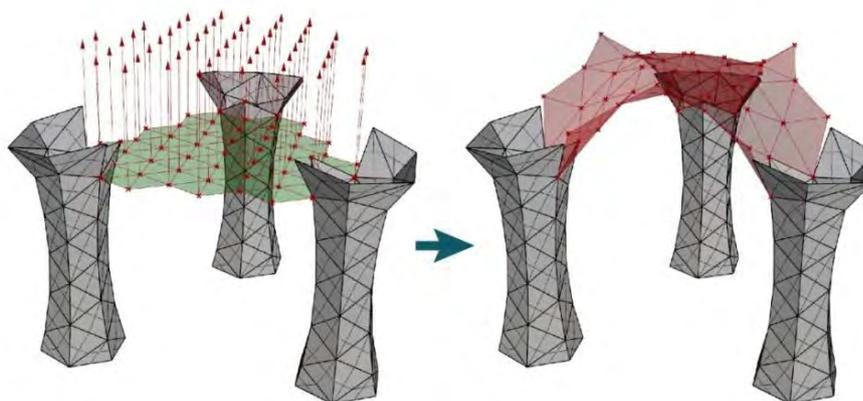


Fig 17: Canopy form-finding – inverse catenary simulation with Kangaroo.

Habiendo optimizado la forma total del pabellón, procedimos a poblar la superficie con el sistema de tensegridad laminar Morflex. Para ello, usamos el plug-in Lunchbox para Grasshopper de Nathan Miller para panelizar las columnas con paneles triangulares, procurando que los paneles resultantes sean triángulos casi equiláteros. Para decidir el número de divisiones del panelizado, nos referimos a los modelos a escala existentes del pabellón. En cuanto a la cúpula, empezamos con una malla triangulada plana la cual deformamos aplicándole una fuerza de “gravedad” invertida con Kangaroo, así como una fuerza que iguala los lados de cada triángulo, y puntos de anclaje en los vértices donde la cúpula se encuentra con las columnas.

Seguidamente, separamos los paneles triangulares en dos grupos: los elementos externos e internos que configuran el sistema de tensegridad laminar de Morflex. El escenario ideal sería tener una malla triangular regular en toda la superficie, donde el grado o valencia de cada vértice sea 6. Esto significa que en cada vértice de la superficie tendríamos idealmente una conexión entre 6 triángulos casi equiláteros, y alternaríamos entre triángulos internos y externos sin tener nunca dos triángulos externos adyacentes. Una excepción son los bordes expuestos del pabellón (bases de las columnas, capiteles y bordes de la cúpula), donde todos los elementos deben ser de tipo externo. En este caso, sin embargo,

para lograr la curvatura del pabellón en las intersecciones entre cúpula y columnas, tuvimos que introducir elementos extra, lo cual resultó en 6 instancias de vértices de valencia 7.

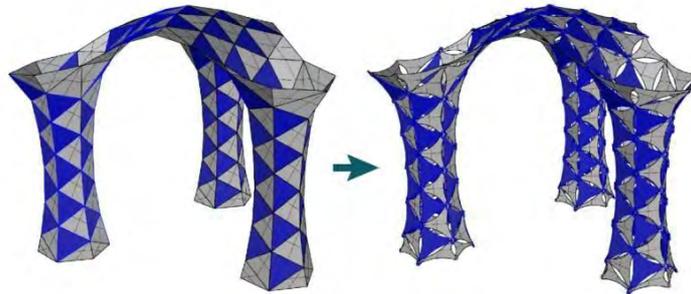


Fig 18: Geometría con panelería y propuesta con los componentes del sistema

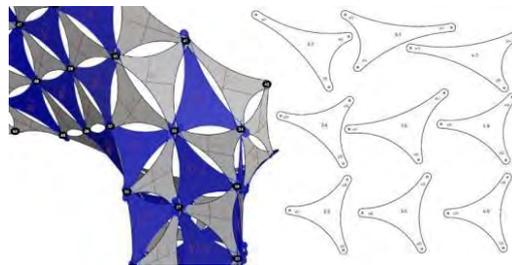


Fig 19: Componentes del sistema: los componentes oscuros son los internos y los claros los externos



Fig 20: Morflex: Primer modelo paramétrico

Después de haber separado los elementos en, de entrada interna y externa de cada grupo de triángulos en un guion saltamontes que hemos creado para transformarlos en las formas reales de los componentes laminares del sistema Morflex. Los elementos internos (los que se flexionan para caber en un espacio ligeramente más pequeño que ellos) fueron escalados por un factor de 1,12 desde el triángulo original.

Por último, cada elemento se le asigna un código en el modelo 3D, y se orientó a continuación, sobre el plano xy para crear los patrones de corte y grabado para cada pieza. Los códigos ayudan a localizar cada pieza en la posición correcta en la estructura para un fácil montaje, y distinguir entre elementos internos y externos. El texto para el código se ha generado utilizando Bowerbird BBText. Desde el pabellón tiene simetría rotacional de $n = 3$ (120°), hay 3 instancias idénticas por variación, 92 elementos diferentes, 276 elementos en total.

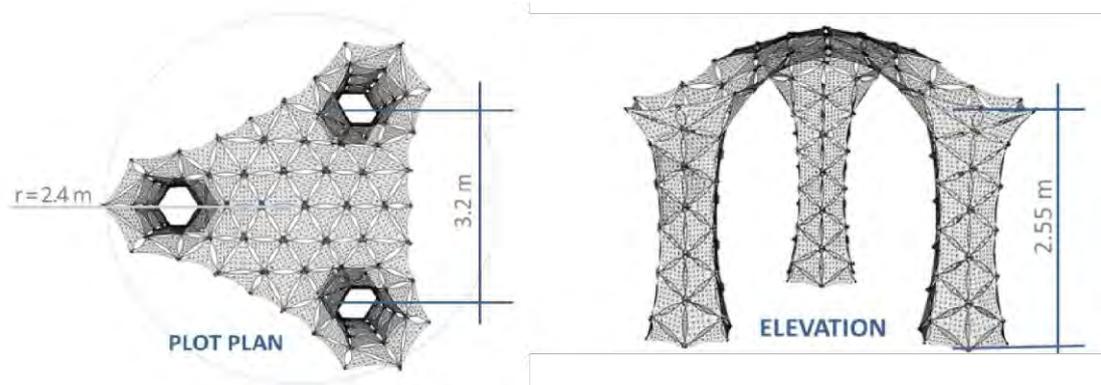


Fig 21: Planimetría, modelo optimizado

2.3. ENSAMBLAJE FINAL: Prototipo paramétrico de escala 1/1



Fig 22: Morflex pabellón paramétrico 1/1

CONCLUSIONES

La principal ventaja del sistema Morflex es su capacidad morfo-estructural para trabajar como un exoesqueleto. Trabajando como una estructura autoportante de cáscara, que nos permite optimizar el uso de materiales y lograr un pabellón liviano y flexible. Es importante señalar que el material de construcción está muy optimizado, en que no hay redundancia de material en el pabellón. La configuración de doble capa es verdaderamente complementaria: nos permite alternar entre los elementos internos y externos, pero tienen sólo un elemento que cubre cualquier área dada. Los únicos lugares donde hay solapamientos del material son en las uniones entre elementos.

En cuanto a la optimización paramétrica del sistema, vamos a seguir investigando el comportamiento del material de los elementos Morflex y pondremos de entrada estos datos en nuestros modelos digitales. Nuestro objetivo es desarrollar algoritmos paramétricos que nos ayudarán a simular la flexión de diferentes formas laminares cuando está montado y presentado a las fuerzas de tracción-compresión,

dependiendo del material, el grosor y la topología con el fin de predecir con exactitud el comportamiento estructural de nuestros diseños.

Las experiencias de investigación realizadas desde el Taller de Escultura –URP, muchas de ellas aterrizadas en concursos, ponencias, proyectos colaborativos entre otros entornos académicos y empresariales, han marcado la trayectoria del sistema Morflex. Lo anterior, genera el compromiso de ser parte activa de la difusión e investigación de este tipo de sistemas, desde una plataforma propia la cual está materializada en el flamante Instituto de Tensoestructuras de la Universidad Ricardo Palma “Roberto Machicao Relis”.

3. Referencia bibliográfica

- [1] J.Peña; R.Garrido (2015) “MORFLEX: Laminar Morphostructural System *Project Application: Amazon Pavilion*” Colaboradores: E. Uyejara; M. Rodriguez S.Ortiz, S.Rodriguez; M. Guin; F.Ricra; M. Cárdenas; C. Jermann; M.Zambrano. Proceedings of IASS Annual Symposia. Ásmterdam - Holanda
- [2] A. Marroquín, R.Garrido, J.Peña (2012) “Docencia de Tensoestructuras, Laboratorio de Tensoestructuras Perú. SLTE 2012. Santiago de Chile – Chile.
- [3] R.Garrido, J.Peña “Morflex - Honeycomb bamboo Morphostructural System” IASS – SLTE 2008 International Conference, (2008); 215-216
- [4] R.Garrido, J.Peña / Co-authors: K.Carpio, M.Fuentes. “Morflex - Laminar Structural System: Bamboo Woven Panels”. IASS 2007 “Shell and Spatial structures: Structural architecture-towards the future looking to the past”; 131-132
- [5] R. Garrido, J. Peña, D. Irribarren. “Morflex: Active Tense - Compressive Structural Mechanism”, Adaptable “International Conference on Adaptable Building Structures” (2006); 9 [251-255]
- [6] R. Garrido, J. Peña, D. Irribarren. “Morflex – Active Structural System Tense - Compressive” “Structural Membranes” International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures II, (2005); 188-196
- [7]R.Garrido, J.Peña, D. Irribarren (2005) “Morflex Active Structural System”, published in the “Entre Rayas” architecture magazine. Caracas – Venezuela, No 25.