



Diseño de una estructura híbrida tipo cáscara usando materiales elásticos naturales en Colombia

E. CORTES-PAEZ*, J. ORR^b, S. EMMITT^a, T. IBELL^b, C. WILLIAMS^c

*Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil, Universidad de Bath
Claverton Down, Bath, BA2 7AY, United Kingdom
eccp20@bath.ac.uk

^a Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil, Universidad de Bath, UK

^b Departamento de Ingeniería, University of Cambridge, UK

^c Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil, Chalmers University of Technology, SE

Resumen (abstract)

Una armónica fluencia de fuerzas en una estructura de cáscara delgada emerge de la correlación entre la forma, el material y el método de construcción. En las dos últimas décadas, los métodos convencionales de construcción empleando formaletas rígidas y concreto reforzado, han convertido las estructuras de cáscara delgada en sistemas costosos e ineficientes debido a la alta demanda de mano de obra. Además, debido a la imposibilidad de reutilizarlas, se convierten en un gran volumen de desperdicio, generando así un impacto ambiental negativo muy alto. Investigaciones recientes se han centrado en la búsqueda de nuevos métodos de construcción con formaletas flexibles que utilizan estructuras de forma-activa a tensión. Estructuras híbridas que combinan membranas y redes de cables, han permitido reducir, reutilizar o integrar la formaleta como parte de la estructura. Pero a pesar de demostrar una optimización en los métodos para construir cáscaras en hormigón reforzado, los materiales y métodos empleados son aún técnica y financieramente inasequibles en países en vía de desarrollo. Esta investigación se ha centrado en desarrollar una propuesta de bajo costo, siguiendo el concepto de sistemas híbridos y formaletas flexibles para adaptarla en el contexto Latinoamericano. Tomando como referente arquetipos de la arquitectura vernácula, es posible identificar sistemas livianos de doble curvatura compatibles con las estructuras de cáscara. Estas estructuras tipo *gridshell* se basan en la construcción de arcos como elemento generatriz y son elaboradas con materiales naturales elásticos como bambú, ramas delgadas o caña castilla, siendo esta última de particular interés para este estudio. Su método de construcción aplica la deformación elástica activa del material vegetal para obtener elementos estructurales curvos a bajo costo. Estudiar la deformación elástica como estrategia de diseño y construcción con un material elástico natural como la caña común puede proveer nuevas alternativas para la construcción de estructuras de cáscara a bajo costo en Latinoamérica. Esta ponencia presenta la aproximación al diseño y los parámetros que rigen esta propuesta de estructura híbrida. También se presentan algunos resultados preliminares de los prototipos experimentales construidos.

Palabras Clave: cáscaras en concreto, active-bending, materiales naturales elásticos, formaletas textiles, estructuras híbridas.

1. Introducción

Una armónica fluencia de fuerzas en una estructura de cáscara delgada emerge de la correlación entre la forma, el material y el método de construcción. Forma y material están sincronizados por su capacidad para soportar cargas a compresión pura, una sincronía que debe garantizarse a través de un detallado proceso de construcción. Basado en este principio de diseño, las estructuras tipo cascara siempre han estado asociadas con el uso de materiales con alta plasticidad y capacidad de moldeo como el concreto. En su estado fluido el concreto reforzado puede adoptar formas geométricas complejas, demostrando un comportamiento ideal ante esfuerzo tensionales a compresión.

Emplear métodos convencionales de construcción con formaletas de madera para edificar un cascara de concreto implica un valor equivalente entre 50% al 78% del costo total de la estructura, mientras en una estructura convencional de pórticos de concreto este valor es del 38%. Este incremento en costos de construcción se da por el alto requerimiento de mano de obra para elaborar la formaleta en el sitio, que usualmente es concebida como una superficie continua, para disminuir los riegos de diferencias dimensionales o retracciones por condiciones térmicas. Estos costos también están determinados por la complejidad geométrica de la estructura y el tamaño de esta. A esta desventaja económica, se suma la imposibilidad de reutilizar esta formaleta, lo cual la convierte en una cantidad considerable de desperdicio. Esto genera un impacto negativo para el medio ambiente que ha llevado al declive de este tipo de estructuras en este siglo. Podría argumentarse que el problema y la mayor desventaja del sistema radica en el método de construcción empleado, el cual está basado en elaborar superficies curvas con materiales rígidos y pesados.

Investigaciones recientes en la temática han explorado nuevas alternativas a través de la inclusión de materiales y métodos de fabricación de alta ingeniería, los cuales son propios de otros sistemas estructurales livianos como las tensoestructuras. Estos nuevos métodos han demostrado las ventajas de elaborar formaletas flexibles para hacer más eficiente el proceso de construcción en aspectos como la optimización las formas geométricas, la disminución de material, la posibilidad de reutilización estos moldes o incluso las ventajas de integrar la formaleta como refuerzo de la estructura de concreto. Los materiales sintéticos de alta ingeniería son livianos, y poseen un alto módulo de resistencia a la tensión y a la deformación elástica, como es el caso las membranas estructurales y los cables. El potencial de las formaletas flexibles ha radicado en la combinación de dos sistemas parentales de tensión activa para generar una formaleta híbrida estable y resistente.

Pero a pesar de la optimización formal y funcional que ofrecen estos los métodos de construcción usando formaletas flexibles, la mayoría de los materiales empleados son técnica o económicamente inasequibles en países en vía de desarrollo. En el caso de Colombia materiales como el GFRP son importados de países desarrollados y proponer su uso para la elaboración de formaletas implicaría tener una alta demanda de estructuras tipo cascara, lo cual resulta inviable. Pero la capacidad de para configurar superficies curvas bajo deformación elástica no es una propiedad exclusiva de los materiales sintéticos. Incluso el potencial constructivo de esta técnica de diseño y construcción proviene originalmente de las estructuras vernáculas livianas estudiadas por Frei Otto, las cuales eran elaboradas con materiales flexibles como delgadas ramas de pino o cañas de bambú.

2. Las formaletas flexibles: pasado y futuro de las estructuras de cáscara en concreto

La flexibilidad usualmente se asocia con una falla de rigidez en los sistemas convencionales de formaleta. No obstante, desde la perspectiva de las formaletas flexibles, esta es una ventaja para facilitar la construcción de superficies curvas. Un material liviano y elástico puede adoptar curvaturas funiculares con menor esfuerzo que un material rígido, ya sea por aplicación controlada de fuerzas tensionales o por su peso propio cuando cuelga libremente soportado de ambos extremos, como el caso de la cadena en la ley de Hooke. Este axioma fundamental en el diseño de tensoestructuras, también es fundamental para el diseño de cascara de concreto. Ochsendorf and Block [1] explican que al invertir

la forma catenaria producida por una cadena que soporta su propio peso, se puede obtener un arco catenario que trabaja a compresión pura. Este principio de diseño de las estructuras de cascara basado en las leyes de la física, ha sido denominado por ellos como la ley de inversión de Hooke.

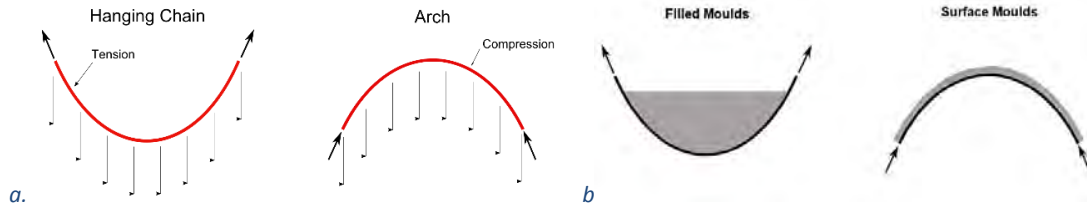


Figure 1. a. Axioma de Hooke de la cadena invertida; imagen Lwphillips [2] b. Tipos de formaletas flexibles para cascara de concreto adaptado de Hawkins, et al. [3]

Las formaletas textiles han sido el método de formaleta flexible más difundido para fabricar estructuras de concreto. De acuerdo con Orr, et al. [4], una formaleta textil consiste en reemplazar la superficie de contacto en un molde convencional de metal o madera, con una membrana estructural, moldeada con la curvatura deseada. Sobre la membrana se posiciona el refuerzo y posteriormente se vierte el concreto. Para seleccionar el material de la membrana, un método común es el empleo de los cuadros de diseño comparativo de propiedades mecánicas de los materiales de Ashby [5]. En mayor profundidad Cauberg, et al. [6] determinaron con su estudio que son apropiados como material para formaletas los textiles tejidos y no tejidos compuestos por una matriz de PVC, PP y PE. Adicionalmente este estudio especifica en detalle que para asegurar un buen desempeño, se debe tener en cuenta un rango de textiles que tengan entre 40 a 150 kN/m en resistencia a la tensión, con módulo de elasticidad entre 0.1 y 1 GPa y deformaciones entre el 18-30%.

Hawkins, et al. [3] presenta una clasificación de las formaletas textiles, según el método de aplicación del concreto. Si se emplean membranas colgando libremente de un marco rígido, estos se consideran como un molde de llenado interno y la forma se determina por el peso del concreto. Por el contrario, si el molde es una membrana pretensada o una estructura neumática, se considera un molde de superficie. Ambos ejemplos se muestran en la figura 2. Hawkins, et al. enfatiza que los moldes de superficie son los más comunes en la construcción de estructuras tipo cáscara. Sin embargo, una desventaja de los moldes flexibles es que se pueden generar deformaciones elásticas inesperadas, que afectan la forma geométrica final del diseño.



Figure 2. a. & b. El Sistema Ctesiphon de Waller & Aston; fotos del Archivo *Irish Architectural* (álbum Waller) c. Bocetos de Neff detallando el sistema *balloon-house*; imagen de [7]

El uso de formaletas textiles como moldes de superficie para la construcción de cáscaras de concreto no es nuevo, este método inicio en la década de los 40's con un sistema de bajo costo llamado *el Ctesiphon* en el Reino Unido. Este sistema creado por los ingenieros Waller and Aston [8] usaba tela de arpillerá de yute, comúnmente conocida como tela de saco, para tensarla a modo de membrana entre dos arcos de acero paralelos, que eran elevados manualmente en el sitio de la construcción. Luego la tela era recubierta con una capa mortero o concreto de alta resistencia, dejándola inmersa como refuerzo interno

de la membrana de concreto. Con este proceso se podían elaborar delgadas cáscaras tipo bóveda o domos, un ejemplo se aprecia en la figura 2a y 2b. La delgada lámina de concreto obtenía la rigidez a través de las curvaturas o corrugaciones de la superficie. Por esta misma década también se originó el uso de estructuras neumáticas como formaleta para la construcción de casas tipo domo llamadas *balloon-houses*. El sistema patentado por Neff Wallace en 1941 usaba una tela tipo lona impregnada en caucho (como la usada para elaborar globos aerostáticos), la cual inflaba con aire, para generar una superficie curva que cubría con una malla de acero y concreto (Wallace [7], Pugnale and Bologna [9]).



Figure 3. Sistema de formaleta híbrida Nest-Hilo empleando una red de cables y una membrana; fotos de Naida Iljazovic del grupo de investigación BLOCK en Zúrich

La investigación sobre estos métodos constructivos con formaletas textiles solo se retomó en el nuevo siglo, soportada por los avances tecnológicos que ofrecieron nuevos métodos de fabricación y materiales elásticos de alta resistencia. Paralelo a esto, nuevas herramientas computacionales han permitido optimizar y facilitar el cálculo de estos sistemas de formaleta flexibles. Pronk, et al. [10] y West [11] han liderado diversas investigaciones en Los Países Bajos y Canadá respectivamente. Sin embargo, el problema de escalar estas soluciones de los modelos escala hacia construcciones aplicadas siempre ha estado restringida por una barrera tecnológica. Enfocados en este problema Veenendaal, et al. [12] desarrollaron un sistema híbrido de formaleta para cáscaras anticlásticas en concreto reforzado. El sistema se basa en una combinación de una red de cables con una membrana textil, que incluye un sofisticado método de manufactura con materiales de alta ingeniería, tal como se ilustra en la Fig. 6. La combinación de ambos sistemas permite reducir las deformaciones elásticas que la membrana no puede asumir con el peso del concreto fresco (Méndez Echenagucia, et al. [13]).

Sin embargo, en soluciones de alta tecnología como la obtenida en esta cubierta a escala por el grupo BLOCK en Zúrich, se prioriza la optimización formal y estructural sobre los costos financieros. Se podría afirmar que los métodos de fabricación de alta ingeniería usando CNC, sensores en los nodos de la red e impresión 3D, relegan estas novedosas aplicaciones a países donde estas tecnologías son asequibles a un nivel industrializado. Las soluciones de bajo costo, empleando métodos con más bajos requerimientos son escasas. Un ejemplo son las estructuras *gridshell* o cascaras tipo malla propuestas por Frei Otto en 1960, cuando comenzó el declive de las cascaras de concreto. Conceptualmente Otto describe esta tipología como *'una estructura curva a compresión'* obtenida mediante la deformación elástica aplicada a una *'una malla de celosía gruesa flexiblemente rígida'* Roland [14].

Las *gridshell* o domos tipo malla son estructuras de forma activa que de acuerdo a Engel [15] pertenecen a una subcategoría de las estructuras de arco. No obstante, basados en Lienhard [16] que define las estructuras de flexión activa como *'un sistema estructural que incluye vigas curvas o cáscaras que basan su geometría a partir de la deformación elástica de elementos rectos o configuraciones de mallas planas'*, se puede afirmar que las *gridshells* son parte de esta tipología. Los materiales más comunes en la construcción de esta tipología de cascaras han sido materiales con un alto módulo de elasticidad a la flexión, por ejemplo, barras de acero, perfiles de aluminio, perfiles circulares de madera, tubos de PVC y láminas de bambú. La intención de esta investigación es explorar el uso de un material alternativo perteneciente a la misma familia del bambú, conocido como caña gigante, caña silvestre o caña de Castilla.

3. Validación de la caña común como un material para estructuras de doble curvatura obtenidas por flexión activa

Gramíneas gigantes como el bambú, la caña o incluso las delgadas ramas de los árboles fueron los recursos primarios empleados por antiguas civilizaciones para erigir sus primeros refugios (Oliver [17]). Otto [18] argumenta que las técnicas de construcción empleando materiales vegetales flexibles fueron más simples y rápidas para construir que tallar rocas o construir con tierra. La deformación elástica es una característica común en la naturaleza y tal vez de allí fueron imitadas estas formas curvas. Basta con mirar la curvatura que toman las delgadas ramas de los árboles con el peso de las hojas.

La evolución geométrica de las estructuras vernáculas obtenidas por flexión activa comprende superficies de simple curvatura como las bóvedas o doble como los domos [17, Fig. 4a]. Según Dunkelberq, et al. [19] los materiales vegetales que tienen un mejor comportamiento estructural cuando se agrupan en un haz para generar sección más gruesas, que al emplearlos como un solo elemento, se conocen como *materiales flexible no-rígidos*. En este grupo se encuentran materiales como la paja, la caña silvestre y las ramas delgadas de especies maderables. La caña tiene un perfil circular o elíptico variable, que es más grueso en la base y disminuye hacia el extremo. Cuando se agrupan radialmente varias cañas generan elementos cónicos, que dependiendo del tipo de conexión que ata los dos extremos, puede producir diferentes tipologías de arcos (Fritz, et al. [20, Fig. 4b, c]).

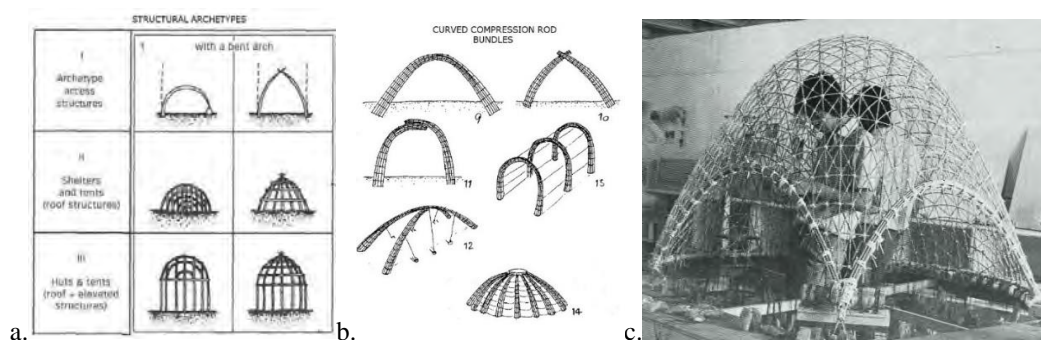


Fig. 4 a. Arquetipos estructurales en la arquitectura vernácula de Oliver [17] b. Configuraciones espaciales usando haces de materiales no-rígidos en [20]. c. Prueba de un prototipo estructural gridshell hecho con tiras de bambú por el IL de Frei Otto, imagen en Dunkelberq, et al. [19]

El interés de esta investigación en la caña gigante *Arundo donax* L., se debe a diferentes factores como costo, eficiencia, comportamiento mecánico y métodos de construcción con bajo impacto ambiental. Primero la caña es una de las especies invasivas más diseminadas alrededor del mundo como se aprecia en la Fig. 5. Esta tiene una alta tasa de productividad cercana al 49 t/ha bajo condiciones climáticas ideales como aquellas comunes en las zonas mediterráneas donde la temperatura ronda los 14 °C- 35 °C y la altitud es cercana a los 1.500 m.s.n.m. [21, 22]. En Colombia estas condiciones se cumplen en varias regiones del territorio como se parecía en la Fig. 5. En términos taxonómicos, el bambú y la caña silvestre pertenecen a la misma familia, lo cual explica similitudes físicas como el tallo hueco dividido en por segmentos o nudos y su sección cónica. Sin embargo, el tallo de la caña crece en diámetros menores, alcanzando solo 40 mm y 7 metros de altura. El diámetro y el grosor de la pared son los que determinan las propiedades mecánicas de este material [23, 24].

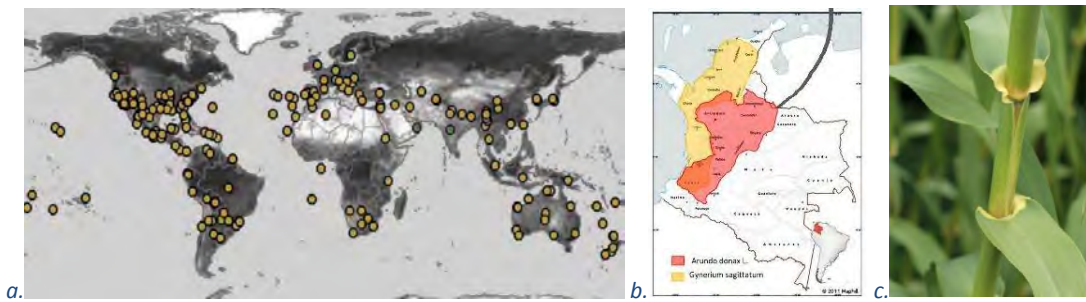


Fig. 5. a. Mapa de distribución de la caña común alrededor del mundo. [Fuente <http://www.discoverlife.org>]. b. Mapa de distribución de la caña *Arundo donax L* en Colombia

La segunda razón es una validación cuantitativa de la caña como material para estructuras de flexión activa, empleando la metodología propuesta por Lienhard, et al. [25]. Con datos obtenidos del estudio de caracterización mecánica realizado por García-Ortuño [26] se calculó el coeficiente entre la resistencia a la flexión $\sigma_{M,Rd}$ [MPa] y el Módulo de elástico a flexión de Young E [GPa] mostrado en la Fig. 3. Lienhard, et al. [25] define que los materiales adecuados para estructuras obtenidas por deformación elástica el coeficiente debe corresponder a un rango de $\sigma_{M,Rd}/E > 2.5$. El valor calculado para la caña silvestre equivalente al 4.8 y la sitúa por encima de materiales como el pino, roble o haya usados en varias estructuras del ITKE, pero se encuentra por debajo de materiales manufacturados como el triplex o plywood F25 y los tubos de papel comunes en la arquitectura de Shigeru Ban.

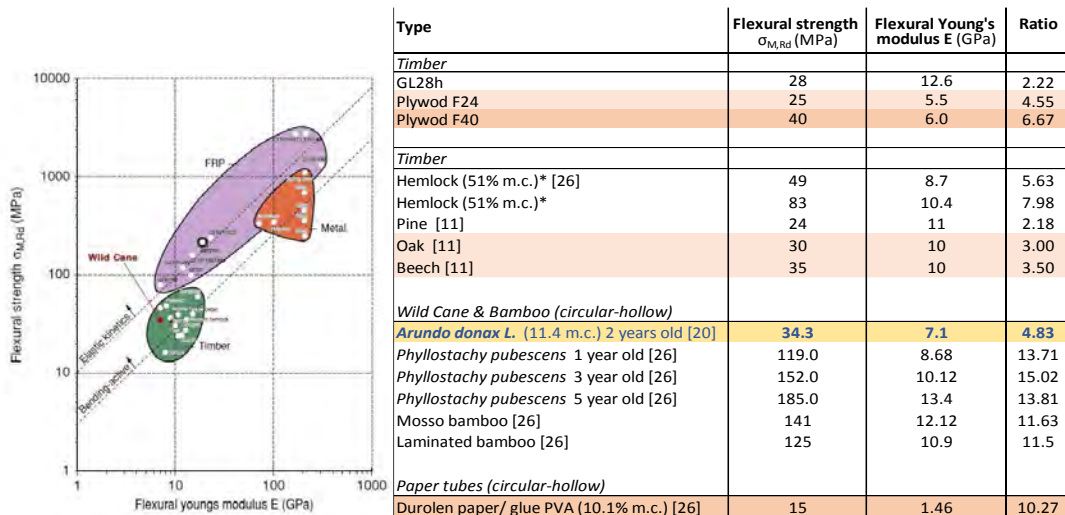


Fig. 6. a. Gráfico de los materiales para active-bending propuesto en [25] modificado con el coeficiente para la caña. b. Tabla de cálculo del coeficiente entre la resistencia a flexión contra el Módulo a la flexión de Young elaborada con información de [11, 20, 26]

Finalmente, la factibilidad constructiva de estas estructuras hechas con caña silvestre está basada en una técnica de actual que usa haces de caña para crear estructuras de doble curvatura. El método Canya Viva desarrollado en España por el arquitecto Cory-Wright se ha difundido como una técnica sustentable y de bajo costo en países como España e Italia [27]. El método puede definirse como una aproximación empírica basada en el comportamiento a flexión activa de elementos de caña común, para construir superficies de doble curvatura como se aprecia en la Fig. 7. El método Canya Viva tiene una calibración diametral de las cañas que se asocia con las luces de los arcos que se pueden obtener. Los arcos son el

elemento directriz de diseño en la configuración espacial. Según Andújar M. , et al. [28] el proceso de construcción consta de cuatro etapas: los módulos de 7 cañas, la configuración de los módulos en una columna tipo V, la unión de las dos columnas en un elemento y su deformación elástica para generar el arco parabólico. Colectivos independientes de arquitectura como Investigació Canyera y Volta Arquitectos en Barcelona han desempeñado el rol de diseñar, enseñar e investigar empleando la técnica Canya Viva a través de workshops, donde la comunidad es capacitada en el conocimiento del método y el material.



Fig. 7. a. / b. Proceso de doblado activo de un arco con el método Canya Viva; fotos por el autor e Investigació Canyera

4. Diseño de la estructura de formaleta híbrida usando gridshells y membranas

4.1. Análisis de estudios de caso

De acuerdo con Lienhard [16], una estructura híbrida es la integración de dos sistemas estructurales con diferente comportamiento en la transmisión de esfuerzos internos, dentro de una misma estructura, buscando una relación interdependiente de equilibrio para incrementar la rigidez. Mas adelante el añade *'funcionalmente, la integración de vigas elásticas a una superficie de membrana pretensada ofrece la posibilidad de disminuir las fuerzas tensionales y crear puntos libres en las esquinas. El sistema se estabiliza por la acción de las vigas elásticas, que a su vez, están restringidas por la membrana'* [16, p. 14]. Siguiendo esta misma idea conceptual de las estructuras híbridas como solución al problema constructivo de las cascaras de concreto, esta investigación propone combinar dos sistemas livianos en un solo método de construcción híbrido: una gridshell hecha en caña silvestre soportando una membrana en la función de formaleta textil. Desarrollar este sistema constructivo basado en la deformación elástica de ambos materiales, implica una estrategia de diseño integral donde la forma, la función y la edificación tienen como directriz el comportamiento a la flexión de la caña. La selección de esta estrategia de diseño, así como los materiales corresponde al interés por desarrollar una solución económica, eficiente, practica y de bajo impacto ambiental para elaborar cascaras en regiones rurales de Colombia.



Figure 8. Proyecto de Yoh empleando una formaleta de malla en bambú combinada con una membrana para la cubierta del Centro Comunitario y guardería en Naiju; fotos ARCPROPECT

Utilizar una estructura generada por *active-bending* como formaleta para una cascara de concreto, tiene ventajas constructivas en tiempo y costo, comparado con una formaleta rígida. Casos de estudio soportan la hipótesis de esta tesis, que sustenta que es posible combinar ambas estructuras para generar formaletas permanentes, que añaden un acabado interno interesante a la cascara de concreto. Dos

proyectos en Japón construidos por Shoei Yoh +Architects: El Centro Comunitario para personas de la tercera edad en Uchino y el Centro Comunitario y Guardería en Naiju, aplicaron esta técnica en la década de los años 90's (Chilton and Tang [29]). Usando una estructura de malla elaborada con láminas de bambú, sobre la cual apoyó la membrana, se facilitó la construcción de dos cubiertas tipo cáscara en concreto, como se aprecia en la Fig. 8. La novedad de esta investigación está en explorar la deformación elástica de un material poco estudiado, pero común en la construcción vernácula en Colombia, como lo es la caña silvestre. Adicionalmente este estudio pretende abordar una aproximación al diseño basada en el comportamiento elástico de la caña, para dictar la forma geométrica y los procedimientos constructivos. Dicha técnica se ha explorado hasta ahora solo en materiales manufacturados como los tubos de GFRP.

Estudios del comportamiento mecánico de la caña común, así como de arcos estructurales elaborados a partir de este material usando la técnica Canya Viva (Andújar M. , et al. [28], González-Bejarano and Silva-Delgado [30]), demuestran su capacidad para soportar esfuerzos a la compresión. Mesnil en su estudio sobre gridshells afirma que *'la estructura pretensada más simple, donde el pretensionamiento está vinculado a la obtención de rigidez geométrica es un arco'* lo cual valida que la construcción de estructuras tipo domo usando el método Canya Viva, pueden ser consideradas dentro de la categoría de gridshells. Por lo tanto, para el desarrollo de las estrategias de diseño, así como del método de construcción, se extrapolaron resultados de estudios anteriores sobre gridshells o cáscaras tipo malla. De igual forma se ha seleccionado como caso de estudio en esta investigación una estructura tipo domo construida con la técnica Canya Viva por el grupo por Investigació Canyera, Volta Arquitectos y Can Batlló, para aplicar y validar estos conceptos extraídos de las estructuras gridshell. El proyecto en el cual participo el autor de esta investigación fue construido en marzo de este año en la ciudad de Barcelona y tenía como intención la recuperación de un parque infantil, a partir de una iniciativa comunitaria, donde habitantes del barrio contribuyeron en la edificación del proyecto que se aprecia en la Fig. 5



Fig. 9. Diseño de una cubierta de sombra para un parque infantil en Barcelona por Investigació Canyera, Volta Arquitectos y Can Batlló, fotos por Investigació Canyera.

4.2. Principios de diseño

Lafuente Hernández [31] presenta un estudio detallado sobre los criterios para el diseño y construcción de estructuras gridshell desde el análisis de su comportamiento elástico. La investigación evalúa la geometría y los esfuerzos resultantes del proceso de deformación elástica, así como la capacidad de carga de estas estructuras a través de un modelo de cálculo empleando un método tridimensional de análisis numérico no-lineal para obtener mallas con patrones variables. En contraste el estudio de Mesnil mencionado antes se enfoca en analizar estas estructuras a través de un arco pretensado, para comprender el comportamiento de mallas ortogonales, siendo más pertinente a esta investigación. Ambos estudios tienen un enfoque en el estudio de perfiles huecos tubulares de GFRP, que comparten similitudes con las dimensiones del diámetro y grosor de la pared de un perfil de caña silvestre empleado en la construcción de la cubierta en el parque en Barcelona, con el método Canya Viva. Sin embargo, el método se basa en la agrupación de 7 perfiles de caña para incrementar la sección geométrica y así obtener mayor capacidad portante, tal como se ve en la Fig. 7. En términos del active-bending esto

significa una restricción en la curvatura elástica, pero una mayor rigidez y reducción del pandeo de la deformación del arco ante cargas.

En términos de criterios de diseño, Lafuente-Hernández sugiere tres aspectos desde una perspectiva de la ingeniería: la geometría de la malla, el estrés residual y la rigidez final de la estructura. No obstante, la aproximación de esta investigación pretende integrar aspectos arquitectónicos empleando un material de naturaleza distinta al estudiado por Lafuente-Hernández y Mesnil. Por esta razón partiendo de los criterios sugeridos por ambos estudios se ha diseñado una nueva aproximación de diseño que es relevante para el problema que se estudia en este caso como se aprecia en la Fig. 10. Allí se incluyen en la visión de diseño, tanto los criterios arquitectónicos, como los criterios estructurales y constructivos en una visión integral. El sistema de formaleta híbrida que se propone se ha denominado *Cañacreto*, por la fusión de las dos técnicas constructivas, la caña y el concreto.

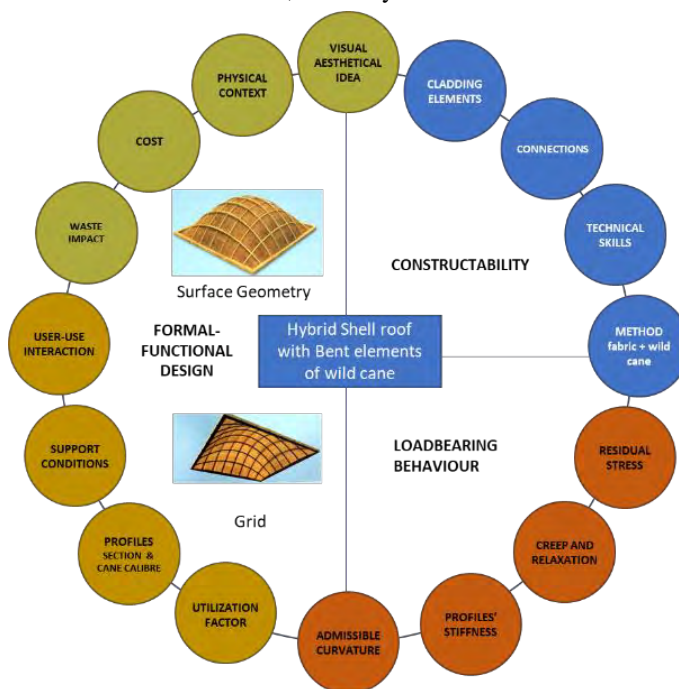


Figure 10. Criterios de aproximación al diseño del sistema de construcción híbrida *Cañacreto*

Esta aproximación es una conceptualización integral del método que se aplicará para la construcción del prototipo de cáscara y se compone de tres etapas de desarrollo. En la etapa formal y funcional del diseño, se involucran las variables arquitectónicas junto con los requerimientos estructurales para lograr la articulación entre forma y función, algo primordial en el diseño de estructuras tipo cáscara. En la etapa de análisis del comportamiento se busca a través de ensayos físicos con arcos de caña validar elementos del comportamiento a la deformación elástica que hasta ahora se aplican de forma empírica en el método *Canya Viva*. Esta parte sigue los mismos preceptos descritos por LaFuente-Hernández en su trabajo. Finalmente, la etapa constructiva consiste en la integración de la formaleta textil con la estructura de gridshell. Los criterios aquí expuestos se basan en un método estandarizado de aplicación, obtenidos del estudio de otros prototipos de cáscaras en concreto construidos a través del uso de formaletas flexibles. Para este proceso se ha considerado como opción emplear la formaleta textil para elaborar elementos prefabricados de doble curvatura. Estos elementos luego serán usados como recubrimiento de la gridshell elaborada en caña, a través de conectores en los nodos, generando así el prototipo híbrido esperado.

5. Discusión

La forma y las fuerzas son dictadas por leyes fundamentales de la que se convierten en principios de diseño. Combinar el principio de la ley de inversión de Hooke, con un método de aproximación al diseño través del comportamiento elástico de un material como la caña, asegura las posibilidades funcionales y constructivas de un diseño novedoso. De igual manera se considera que utilizar una aproximación al diseño basada en active-bending o deformación elástica, reduce la complejidad de ciertos procesos constructivos, permitiendo el uso de tecnologías locales, que no requieran alta ingeniería. La deformación elástica ha sido parte de métodos de construcción vernácula y aplicarla bajo un nuevo método de diseño le brinda nuevas oportunidades de optimización a conocimientos tradicionales que paulatinamente se han ido perdiendo. Finalmente, las formaletas textiles son un método compatible con las estructuras gridshell, debido a que ambas tipologías se fundamentan en la deformación elástica de los materiales (la tela y la caña) para incrementar la rigidez y la capacidad portante. Algunas preguntas que surgen de esta etapa inicial para determinar el avance de esta investigación son:

- ¿En qué medida un método de diseño empírico basado en el comportamiento elástico del material puede convertirse en un método preciso para la obtención de superficies de doble curvatura? Y ¿cómo lograr esto apoyado solo con métodos simples de cálculo geométrico y modelos físicos para obtener la sincronía de forma y función esperada?
- ¿Cuál es el espectro de variabilidad geométrica alcanzable con estos moldes híbridos basados en estructuras obtenidas con arcos de caña y formaletas textiles?

5. Conclusiones

Existe un enorme potencial en investigar el uso de sistemas de construcción híbrida a partir de la combinación de dos sistemas livianos, con el objetivo de optimizar el comportamiento estructural y mejorar las debilidades de ambos sistemas, cuando trabajan de forma independiente. En este caso, el uso de estructuras active-bending en caña combinadas con un sistema de membrana, para generar una formaleta híbrida, permitiría una solución de bajo costo y baja tecnología para países donde la técnica y los materiales son viables, como en Colombia.

Explorar los sistemas y métodos de construcción vernácula, tal como previamente lo hizo Otto en el Instituto de Estructuras Ligeras y lo retoma Lienhard en su estudio de las estructuras active-bending, permite redescubrir un nuevo potencial en los materiales naturales como la caña silvestre, para generar métodos constructivos de menor impacto ambiental. De igual forma esta etapa inicial de la investigación ha demostrado que la caña no solo hace parte del pasado constructivo de países como España o Colombia, también sigue vigente en construcciones actuales, pero en el caso de Colombia se requiere un proceso de optimización del método a través del diseño, para obtener un mayor potencial, similar al del método Canya Viva en España. Una estrategia integral de diseño permitirá cambiar la visión errónea que existe sobre el material, de no ser durable y tener una baja categoría constructiva. Esta investigación aspira que a través de la inclusión de esta nueva estrategia de diseño basada en el active-bending, se haga evidente que las soluciones de bajo costo y baja tecnología siguen siendo necesarias no solo en países en desarrollo como Colombia, también en países industrializados con España o Italia.

Reconocimiento

Esta investigación es financiada a por la entidad colombiana para el apoyo de la investigación Colciencias a través de una beca para estudio doctorales que se está realizando en la Universidad de Bath en el Reino Unido

El autor de esta investigación también desea agradecer a Marta Arnal Estapéal, Marc Fando Morell y Júlia de Orovio Soler del grupo Investigació Canyera por su apoyo en esta investigación con información sobre el proyecto de su autoría construido en Can Batlló y al cual fue invitada a participar en la construcción, lo cual fue una experiencia crucial en el desarrollo de esta etapa de investigación.

Citas:

- [1] J. Ochsendorf and P. Block, "Exploring shell forms," in *Shell structures for architecture*, S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, and C. Williams, Eds., ed New York: Routledge, 2014, pp. 7-12.
- [2] Lwphillips, "Shape of hanging chain versus arch," vol. 1,322 × 554 pixels, S. o. h. c. v. arch.png, Ed., ed. wikipedia, 2013, p. Lwphillips.
- [3] W. J. Hawkins, M. Herrmann, T. J. Ibell, B. Kromoser, A. Michaelski, J. J. Orr, *et al.*, "Flexible formwork technologies – a state of the art review," *Structural Concrete*, vol. 17, pp. 911-935, 2016.
- [4] J. Orr, A. Darby, T. Ibell, M. Evernden, and M. Otlet, "Concrete structures using fabric formwork," *Structural Engineer*, vol. 89, NUMB 8, pp. 20-26, 2011.
- [5] M. F. Ashby, "4. Material Property Charts," in *Materials Selection in Mechanical Design (4th Edition)*, Elsevier, Ed., ed: Elsevier, 2011.
- [6] N. Cauberg, T. Tysmans, S. Adriaenssens, J. Wastiels, M. Mollaert, and B. Belkassen, "Shell Elements of Textile Reinforced Concrete Using Fabric Formwork : A Case Study," *Advances in Structural Engineering*, vol. 15, pp. 677-690, Apr 2012.
- [7] N. Wallace, "Building construction," USA Patent, 1941.
- [8] J. H. W. Waller and A. C. Aston, "CORRUGATED CONCRETE SHELL ROOFS," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 2, pp. 153-182, 1953.
- [9] A. Pugnale and A. Bologna, "Dante Bini's air structures (1964-1979)," in *First Conference of the Construction History Society*, Cambridge UK, 2014.
- [10] A. D. C. Pronk, T. Bullens, and T. Folmer, "A faesable way to make freeform shell structures.," presented at the IASS International Conference on Spatial Structures, Venice, 2007.
- [11] M. West, "Thin shell concrete from fabric molds," U. o. Manitoba, Ed., ed. Manitoba, Canada: The Centre for Architectural Structures and Technology, 2009, p. 35.
- [12] D. Veenendaal, M. Bezbradica, D. Novák, and P. Block, "Controlling the geometry and forces of a hybrid cable-net and fabric formwork for thin concrete shells," Brasilia, 2014.
- [13] T. Méndez Echenagucia, D. Pigram, A. Liew, T. Van Mele, and P. Block, "Full-scale prototype of a cable-net and fabric formed concrete thin-shell roof," in *IASS 2018 Creativity in structural design*, Boston 2018.
- [14] C. Roland, *Frei Otto : structures*. London: Longman, 1970.
- [15] H. Engel, *Structure systems*. New York: Praeger, 2001.
- [16] J. Lienhard, "Bending-Active Structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein," PhD in Engineering, Faculty of Architecture and Urban Planning Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart, Stuttgart, 2014.
- [17] P. Oliver, *Encyclopedia of vernacular architecture of the world*: Cambridge University Press, 1997.
- [18] F. Otto, "Comments on the history of rod structures," in *Bambus : Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben / von/Bamboo : bamboo as a building material : building with vegetal rods / by Klaus Dunkelberg Klaus Dunkelberg*, K. Dunkelberg, S. Gass, and F. c. Universität Stuttgart. Institut für Leichte, Eds., ed Stuttgart: Stuttgart : Karl Krämer, 1992., 1992.
- [19] K. Dunkelberg, J. Fritz, F. Otto, S. Gass, and J. Arcillo-Lozada, *Bamboo : bamboo as a building material : building with vegetal rods* 2nd ed. vol. 31. Stuttgart: Stuttgart : Karl Krämer, 1992., 1992.
- [20] J. Fritz, S. Gass, S. Greiner, and R. Reiner, "Using vegetable rods for arches ; vaults ; domes and shells," in *Bamboo : bamboo as a building material : building with vegetal rods*, K.

- Dunkelberg, S. Gass, and F. c. Universität Stuttgart. Institut für Leichte, Eds., ed Stuttgart: Stuttgart : Karl Krämer, 1992., 1992.
- [21] O. D. N. Nicoletta Nassi, R. Neri, T. Federico, T. Cristiano, and B. Enrico, "Productivity of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis," *Italian Journal of Agronomy*, vol. 6, pp. e22-e22, 2011.
- [22] R. E. J. Perdue, "Arundo donax: Source of Musical Reeds and Industrial Cellulose," *Economic Botany*, vol. 12, pp. 368-404, 1958.
- [23] H. C. Spatz, H. Beismann, F. Brückert, A. Emanns, and T. Speck, "Biomechanics of the giant reed *Arundo donax*," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 352, pp. 1-10, 1997.
- [24] T. García-Ortuño, M. Ferrández-García, J. Andreu-Rodríguez, M. Ferrández-Villena, and C. Ferrández-García, "Study of the Mechanical Properties of Giant Reed as a green building material," presented at the Second International Conference on Advances In Civil, Structural and Environmental Engineering- ACSEE 2014., Zurich, Switzerland, 2014.
- [25] J. Lienhard, H. Alpermann, C. Gengnagel, and J. Knippers, "Active Bending, a Review on Structures where Bending is Used as a Self-Formation Process," *International Journal of Space Structures*, vol. 28, pp. 187-196, September 1, 2013 2013.
- [26] T. García-Ortuño, "Caracterización de la cana comun (*Arundo Donax* L.) para su uso como material de construcción," PhD in Engineering, Academic department of Engineering, Universidad Miguel Hernandez, Orihuela, Spain, 2003.
- [27] J. Cory-Wright. (2017, 8th of October). *Canya Viva arquitectura natural*. Available: <http://canyaviva.com/index.html>
- [28] R. Andújar M. , M. Fando M. , O. Palou J., B. Peris R. , and J. Maristany C. , "Estudi del comportament mecànic d'arcs de canya *Arundo Donax*," *Quaderns d'estructures*, vol. 46, pp. 38-52, April 2013.
- [29] J. Chilton and G. Tang, "Alternative materials and systems," in *Timber Gridshells: Architecture, Structure and Craft*, C. John and T. Gabriel, Eds., ed UK: Taylor and Francis, 2016.
- [30] S. González-Bejarano and E. Silva-Delgado, "Arundo donax L.: Material de construcción," Ingeniería de Edificación Undergraduate Final project, Escola Politecnica Superior de la Edificacion-Ingeniería de Edificación, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2012.
- [31] E. Lafuente Hernández, "Design and Optimisation of Elastic Gridshells," Department of Architecture Institute for Structural Design and Technology at the UdK Berlin, University of the Arts in Berlin, Berlin, 2015.