

2.2. Enseñanza y difusión

NUEVOS MATERIALES Y FORMAS ARQUITECTÓNICAS PARA LAS CONSTRUCCIONES DE BAMBÚ EN ECUADOR

Daniela Cadena, Arq.¹

Facultad de Arquitectura, Universidad Central del Ecuador/ UMons, Quito, Ecuador.
cdcadena@uce.edu.ec

Thierry Descamps, Ph.D.¹

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Mecánica de Estructuras,
Universidad de Mons, Mons, Bélgica.
thierry.descamps@umons.ac.be

David Laplume, Ph.D.²

Facultad de Arquitectura, Universidad de Mons, Mons, Bélgica.
david.laplume@umons.ac.be

Resumen

Debido a su estratégica ubicación geográfica, Ecuador posee una gran variedad de géneros de bambú, abarcando tanto especies endémicas como foráneas, e incluso falsos bambúes como el carrizo. Sin embargo, únicamente el uso de dos especies (*Guadua angustifolia* Kunth y el *Dendrocalamus asper*) han sido fomentadas en la industria de la construcción; al tiempo que la especie *Phyllostachys aurea* por su parte, se ha limitado a la elaboración de muebles y elementos decorativos, principalmente debido a una evaluación y juicios mal argumentados. La situación es totalmente diferente en países como Argentina o Brasil, donde esta especie se ha comenzado a utilizar en proyectos constructivos. Esta investigación tiene como objetivo explorar el potencial de uso del *Phyllostachys aurea* (y otras especies disponibles en Ecuador) en estructuras arquitectónicas desafiantes y complejas, mediante el uso de estructuras de prueba (enfoque "aprender haciendo"). Los prototipos de *gridshell* a escala real (escala 1:1), hechos de bambú, sirven como instrumentos exploratorios para la observación del comportamiento estructural de estas especies dentro de una estructura compleja. Los recientes avances en el campo de la arquitectura alientan el desarrollo de proyectos innovadores con una alta eficiencia estructural. Las *gridshells* de flexión activa son estructuras de doble curvatura, hechas de rejillas rígidas que permiten flexibilidad en el diseño de espacios cubiertos. A pesar de su aparente simplicidad espacial, las *gridshells* de flexión activa son estructuras complejas para construir. Este trabajo recopila y comenta las experiencias durante las fases de diseño y construcción de tres prototipos de *gridshells* materializados en bambú.

Palabras clave: Bambú, *gridshell*, *Phyllostachys aurea*, aprender haciendo

Introducción

Las *gridshells* son estructuras que provocan fuertes emociones. Para aquellos que han experimentado un descubrimiento tan cenestésico, su simple comprensión visual es una experiencia muy estimulante, que despierta fuertes sensaciones de materialidad y comprensión tectónica (Chilton & Tang 2016). En un diseño impresionante y poco convencional, las *gridshells* combinan un fuerte enfoque geométrico, una perfecta comprensión del comportamiento del material y de todas las técnicas constructivas, que van desde las tradicionales (técnicas de carpintería) hasta el uso de herramientas computarizadas de control numérico (CNC) (Chilton & Tang 2016). El creciente interés

por este tipo de estructuras arquitectónicas se explica por la perfecta fusión entre la estética y la eficiencia estructural dentro de una tipología estructural, pero también por su versatilidad material, brindando a los diseñadores la oportunidad de explorar con recursos alternativos como es el caso del bambú.

Repaso histórico de estructuras *gridshells* y su materialidad

Desde un punto de vista histórico, el primer ejemplo de *gridshell* (como una estructura arquitectónica) data del siglo XIX cuando el mundo atravesaba profundos cambios sociales y tecnológicos. Como Lee Wyatt escribió en *La Revolución Industrial* (2009), estos cambios fueron impulsados por el crecimiento demográfico, la revolución científica y el progreso económico derivado de la innovación. Los desafíos asociados al vertiginoso desarrollo de las ciudades presentaron inéditas restricciones e impulsos a los arquitectos e ingenieros responsables de tomar la iniciativa para satisfacer dicha demanda. Con la incorporación de nuevos materiales empleados en la construcción (hierro, acero, hormigón), surgieron pensamientos creativos que se extendieron por todas las naciones e impactaron a una gran audiencia. Entre ellos, Vladimir Shukhov, un ingeniero ruso nacido en 1853 despertó al mundo de la ingeniería en 1897 con la construcción de la primera forma estructural doblemente curvada, creando un sistema de *gridshell* continuo (Figura 1). Para este hallazgo, el llamado “Edison ruso” empleó herramientas clásicas como las matemáticas y la geometría como elemento analítico, así como también modelos físicos que le permitieron develar información no encontrada durante la etapa de análisis (Edemskaya 2014).



Figura 1: Durante el proceso constructivo, la primera *gridshell* de acero doblemente curvada del mundo (Shukhov 1897).

Las estructuras de *gridshells* se perdieron de vista hasta el final de la Segunda Guerra Mundial, cuando el famoso ingeniero arquitecto alemán Frei Otto las retoma desde una perspectiva atemporal. En 1958, Otto crea el *Institut für Leichte Flächentragwerke* (Instituto para las estructuras superficiales ligeras). En un intento de llevar a cabo estudios sobre opciones constructivas aligeradas funda la base de una nueva escuela de pensamiento donde la naturaleza inspira a los arquitectos e ingenieros, no solo por su estructura geométrica sino también por el uso mínimo de energía y la optimización de materiales. En 1962, en Essen, Alemania, Frei Otto construyó la primera estructura de madera (madera contrachapada) utilizando la técnica *gridshell*, como prototipo de experimentación (estructura de prueba con plano súper elíptico de 15 m por 15 m) (Figura 2a). Trece años más tarde, el gran potencial de las estructuras de *gridshell* se revela con la construcción de la sala multiuso en Mannheim (Figura 2b), diseño basado en modelos físicos funiculares y ejecutada con madera de cicuta. Esta gran malla espacial fue resuelta por tramas unidas mediante nudos flexibles y constituida por varias capas de madera superpuestas que permitieron la flexibilidad y resistencia requerida para evitar el pandeo (Pino 2016). Es a partir de ese momento que, con la utilización de la madera, surgen las *timber gridshells* de flexión activa como una nueva concreción de estructuras tipo cáscara.

En el año 2000, para el *Hanover Word Exhibition*, se diseñó en el pabellón japonés una estructura *gridshell* totalmente reciclable, construida con tubos de cartón hechos de papel estucado (Figura 2c). Su creador fue Shigeru Ban, en trabajo colaborativo con Frei Otto y Buro Happold, quienes lograron diseñar un producto arquitectónico innovador, a pesar de incorporar a la estructura refuerzos adicionales (marco de madera) que fueron solicitados para que el proyecto cumpla con los estrictos códigos que norman al sector de la construcción alemana (Douthe et al., 2010).

Con el nuevo milenio, la era digital y el crecimiento agigantado de la investigación han contribuido a la simplificación en la búsqueda de la forma (*form-finding*), en morfologías estructurales complejas, empleando para tal fin herramientas computacionales en lugar de modelos físicos.

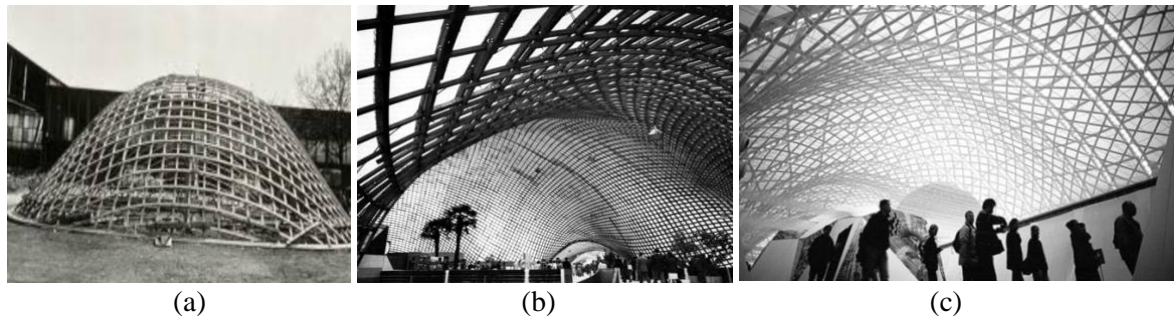


Figura 2: (a) Estructura *gridshell* experimental con madera (Otto 1962), (b) Sala multiuso Mannheim en Timber *gridshell* (Otto 1975), (c) *gridshell* hecha de tubos de cartón para el pabellón japonés (Ban 2000).

Cuando la arquitectura es comprendida como elemento de intuición y experimentación, se propician nuevos descubrimientos en la concepción del espacio y en la diversificación de su materialidad. Por esta razón, este documento quiere mostrar la importancia de mantener ensayos empíricos con modelos físicos, que ayudan a tener un primer acercamiento con el material y la búsqueda de su aplicación en prototipos *gridshells* de flexión activa, garantizando un entendimiento espacial y, a su vez, la comprensión estructural del material. En una entrevista realizada a Shigeru Ban por la revista electrónica FuturArc (2010), el famoso arquitecto mencionó:

"La capacidad de una estructura no tiene nada que ver con la resistencia de los materiales que la componen. Se puede diseñar un edificio para resistir terremotos, con papel como yo lo hago. En realidad, una estructura será resistente si posee un buen diseño estructural"
(Traducción de los autores)

Guiados por este pensamiento, en el Ecuador se realizaron talleres para estudiantes de arquitectura y artesanos quienes construyeron tres prototipos a escala 1:1 de estructuras tipo *gridshell* de flexión activa, sirviéndose de tres especies de bambú, con el propósito de que este trabajo empírico sea una improvisación meditada llena de intenciones, un ensayo asumido como instrumento descubridor de los elementos que fallan o que faltan, y así promover la relación armónica entre estructura y forma arquitectónica, reduciendo su distancia conceptual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Una gran parte de las estructuras *gridshell* de flexión activa han sido elaboradas con madera, aprovechando que este material presenta un bajo módulo elástico que permite el doblado sin ejercer demasiado esfuerzo, y por el hecho que su alta resistencia a la flexión permite curvaturas ajustadas.

Paradójicamente, la creciente demanda de este material disponible en la naturaleza, incentiva la deforestación de bosques primarios en países latinoamericanos con débiles políticas de gestión de este tipo de recursos. Ante este panorama desolador, el bambú se convierte en una opción viable, por guardar semejanzas con la madera. Esta gramínea leñosa cuenta con propiedades de ligereza, flexibilidad y resistencia mecánica, además de ser considerada como un recurso altamente sostenible

por su capacidad de “*automultiplicarse vegetativamente*” y por ser una de las especies vegetales que conserva la mayor cantidad de secuestro de carbono (Londoño 2000). Estos recursos forestales no maderables pertenecen a un amplio grupo de gramíneas, que se extienden en los cinco continentes, donde se estima que su número oscila entre las 1400 a 1600 especies a nivel mundial, un importante conjunto dentro de la “*botánica sistemática*” (INBAR 2015).

América Latina, y Ecuador en particular, ofrece un enorme campo de experimentación en nuevas tecnologías gracias a la generosidad de un territorio de abundantes recursos. Se estima que, por cada kilómetro cuadrado de bosques andinos, el 11% de estos están cubiertos por especies de bambú. Según la Red Internacional de Bambú y Ratón - INBAR (Añazco 2015), en el Ecuador se han registrado 44 especies nativas de bambú, así como otros géneros foráneos, además de falsos bambúes, destacándose entre estos el carrizo, por su popularidad en la zona andina. De todo este registro, el Ecuador cuenta con especies reconocidas a nivel mundial por sus múltiples usos, como la *Guadua angustifolia* Kunth y el *Dendrocalamus asper*, generalmente destinadas al uso en la construcción; o el *Phyllostachys aurea* actualmente de uso limitado a la fabricación de muebles y artesanías.

Si bien la historia constructiva del Ecuador se ha cimentado en técnicas constructivas ancestrales que procuraron el uso eficiente de recursos naturales (madera, bambú, tierra), estas se han visto desplazadas con el surgimiento de nuevos materiales constructivos, ajenos al entorno, y que afectan la tradición constructiva. Resulta pertinente retomar las prácticas originales, abriendo oportunidades para aumentar el uso del bambú en construcciones residenciales y no residenciales.

Exploración y acción participativa

Dewey (1933) afirmaba en su teoría del conocimiento que “*la reflexión incluye a la observación*”, ya que esta se desarrolla efectivamente a través de aplicaciones vivenciales. El propósito de esta interacción es provocar el aprendizaje desde la experiencia, vía el pensamiento reflexivo. Compartiendo el criterio de Dewey, Frei Otto centraba sus esfuerzos en el desarrollo de investigaciones experimentales para el hallazgo de formas innovadoras, fruto de una observación minuciosa de los mecanismos que guarda la naturaleza (Figura 3). Al igual que Otto, ingenieros como Sergio Musmeci y Heinz Isler desarrollaron su trabajo explorando modelos físicos que enfatizaron en la auto organización del material expuesto a fuerzas (Liddell, 2015); de esta manera conseguían resultados originados de la capacidad inherente de un material y mas no de un concepto incomprensible (Figura 4).

En este marco, para la elaboración de este estudio se desarrollaron talleres constructivos como casos de prueba, en los que se pretendió arraigar y fortalecer la comprensión del bambú como material constructivo, sus cualidades tectónicas y estructurales, así como su aplicación en estructuras de *gridshell* de flexión activa. Haciendo referencia a lo que mencionaba Carpenter: “*la estructura de los detalles, los problemas de diseño y la estrategia de construcción se debaten en la atmosfera práctica de la realidad tridimensional. Los mejores arquitectos entienden la lógica y la poética de la construcción y la mejor manera de enseñar esto es construir*” (Carpenter 1997, citado en Jann 2009, citado en Tang 2013), estos talleres, posibilitaron de manera didáctica, la inclusión del enfoque estructural durante la concepción arquitectónica, con el propósito de lograr objetos arquitectónicos atrevidos e innovadores.

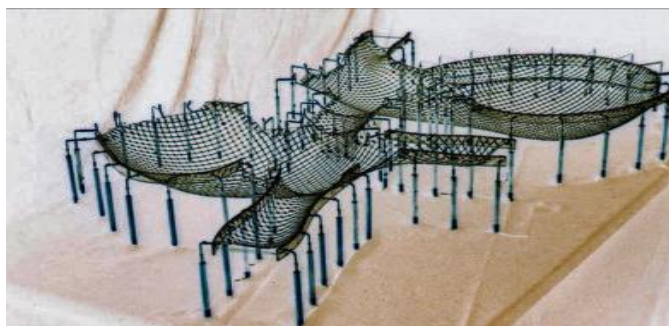


Figura 3: Hallazgo de la forma usando modelos físicos (Otto 1973)



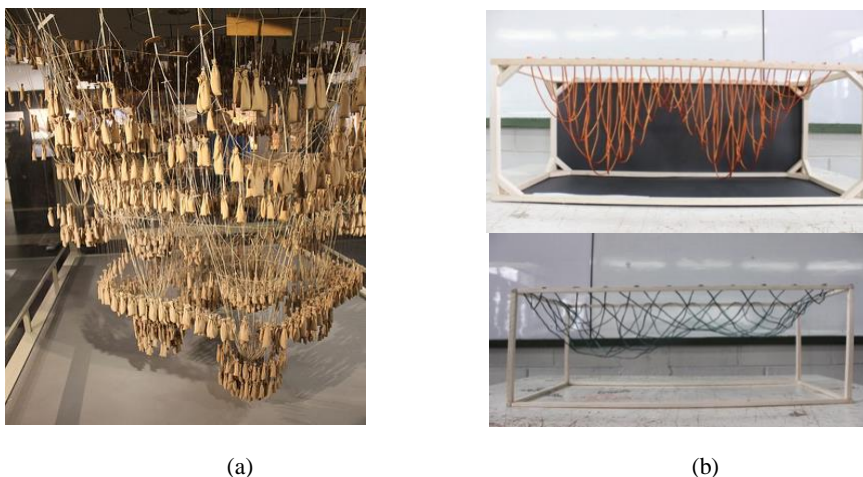
Figura 4: Modelo de cadenas colgantes (Isler 1950)

Descripción de los modelos de estudio

Caso de prueba 1: *gridshell* de doble capa en *Dendrocalamus asper*

Ubicado en la zona centro norte de Quito se encuentra el barrio San Juan, población que se ha visto afectada por el incremento de la delincuencia e inseguridad y el abandono tanto de áreas verdes como espacios públicos. La aplicación del urbanismo táctico como dinámica experimental, promueve la apropiación de estos espacios con la finalidad de activar su uso. Ante este contexto, se desarrolló en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Central del Ecuador (UCE), una serie de charlas explicativas acerca del entorno situacional del barrio y definición de las opciones más viables para la reactivación de estos “no lugares” (conocidos así por su carencia visual en la ciudad). Teniendo como premisa estos antecedentes, se recurrió a la innovación como herramienta mediática. La propuesta consistió en una *gridshell* de flexión activa utilizando el *Dendrocalamus asper* como recurso constructivo. La finalidad de estas estructuras fue la de servir como cubiertas temporales, que, en base al juego proyectual de la luz y la sombra, convocarían a los moradores del sector a la interacción con el espacio circundante.

En una fase preparatoria, los estudiantes de arquitectura participaron en charlas acerca de los principios básicos en el diseño de una *gridshell*, y el comportamiento estructural de este tipo de estructuras de flexión activa cuando estas son elaboradas con madera. Concluida la parte teórica, se realizaron modelos colgantes para la comprensión de la forma ideal de arcos basados en los principios de la catenaria invertida, guiados por el trabajo de Antonio Gaudí en la Sagrada Familia. Si bien Gaudí aprovechó las cadenas colgantes para encontrar la forma óptima de sus cúpulas (Figura 5a), por cuestiones presupuestarias los modelos colgantes de los estudiantes se realizaron con un marco de madera de balsa, piolas, tachuelas y la gravedad (Figura 5b) para así obtener una idea cualitativa de la forma.



(a) (b)
Figura 5: (a) Búsqueda de la forma - Cúpulas de la Sagrada Familia (Gaudí 1882), (b) Modelos físicos realizados por los estudiantes de la UCE.

En el diseño empírico y formal de las estructuras *gridshell* se utilizó papel milimetrado para los bosquejos; y el trazado 2D, alambre flexible y láminas de balsa en los modelos físicos a escala 1:200. Se desarrollaron 15 prototipos en maqueta, que fueron expuestos a la comunidad barrial de San Juan con el objetivo de que esta elija la estructura que mayor impacto generase en estos espacios abandonados (Figura 6).



(a) (b)
Figura 6: (a) Presentación de propuestas *gridshell* para la comunidad de San Juan, (b) Prototipos hechos con madera de balsa en escala 1:200

Estos proyectos sociales no cuentan con financiamiento, un factor que afectó significativamente la fase constructiva al limitar la consecución del material necesario. Para la fabricación de este prototipo se requerían latillas de 9 m de longitud provenientes del *Dendrocalamus asper*, pero solo se lograron adquirir 100 latillas con longitud promedio de 3.5 m, con un ancho de 3 cm y en estado semi seco. Estas medidas propiciaron el uso de traslapes entre las latillas, que serviría para compensar la longitud necesaria y alcanzar la altura idónea del arco, toda vez que estas sean comprimidas y con ello respondan a la cobertura del área determinada en el proyecto. Finalizado el proceso de limpieza y clasificación de tamaños, se realizaron pequeñas incisiones en los extremos a las latillas que harían el traslape, con la finalidad de fijarse en sujeción e impedir futuros desplazamientos durante el ensayo a compresión (Figura 7a). Emulando a Rockwood (*Bamboo gridshells* 2014) quien utilizaba cinchos de plástico (*zip-ties*) como elemento de amarre para sus experimentaciones, se decidió utilizar momentáneamente cinchos de plástico en el proceso de compresión, hasta encontrar la forma más idónea de la estructura. Posteriormente, estos cinchos de plástico serían reemplazados por amarres fijos hechos con alambre flexible, aumentando así su estabilidad. Una vez culminada la preparación de los traslapes en las latillas, se trazaron en el suelo las directrices de la retícula determinada por el diseño (Figura 7b). Esta malla hecha de latillas fue sujeta en cada punto de encuentro con alambre flexible, en los amarres en cruz.

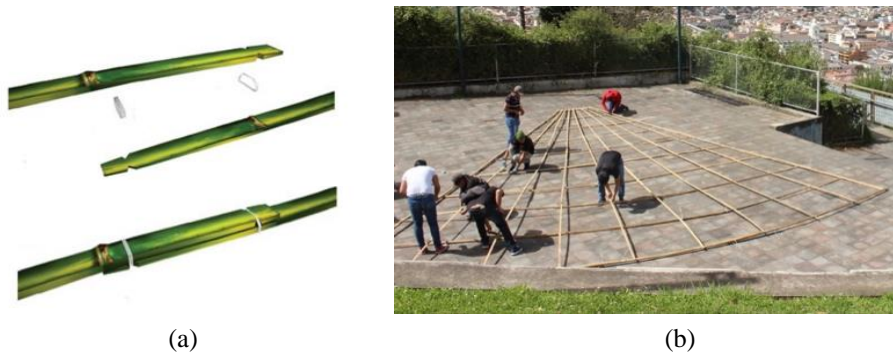


Figura 7: (a) Incisiones en los extremos del bambú para fijar el traslape (Rockwood 2014), (b) Trazado de la retícula en piso.

El primer intento de erección de la estructura falló debido a que la rejilla fue configurada por una sola capa de latillas de bambú, a pesar de que estas contaban con un espesor de pared de 1.5 cm. La mejora de la estabilidad fue propuesta por los estudiantes, quienes colocaron sobre la primera rejilla una segunda capa de latillas que seguían la forma de la grilla, reforzando así la estructura. Una vez conseguida la rigidez necesaria de la estructura, las bases fueron ancladas a probetas cilíndricas de hormigón. Se hicieron uso de estos elementos, por ser una intervención urbanística de carácter efímero. En la segunda erección se reforzó la rejilla de doble capa, así como las uniones entre latillas, utilizando cabuya como elemento de amarre; proceso que, bajo tensión, permitiría una mejor fijación entre sus elementos (Figura 8).

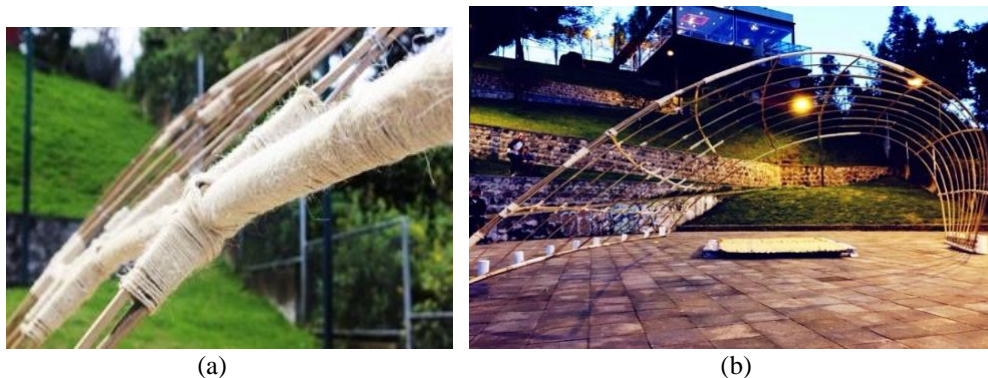


Figura 8: (a) Amarres hechos con cabuya, (b) *gridshell* finalizada y emplazada en el barrio San Juan, Quito.

Caso de prueba 2: *gridshell* de una capa en *Guadua angustifolia* Kunth

Con grandes poblaciones de caña guadua localizadas en la región costera del Ecuador, se vuelve estratégico promover el uso de este recurso como material constructivo. En colaboración con la Universidad de Mons y la Universidad Laica de Manabí, en la ciudad de Manta se realizó un taller de construcción participativa con estudiantes de arquitectura y artesanos del sector, con el propósito de mostrar las posibilidades que tiene la guadua en construcciones modernas. Siguiendo con el mismo esquema del anterior taller y como introducción a la fabricación de modelos físicos a escala, se realizaron ciclos de conferencias acerca de la innovación y su rol fundamental en la promoción del uso del bambú en el Ecuador; y los principios básicos en la generación de estructuras ligeras (énfasis en *gridshell*). En la confección de las maquetas se utilizaron laminillas extraídas de la parte más delgada de los culmos de guadua, con la intención de que estas simularan a las latillas y así tener una información más aproximada a su comportamiento en una escala real. Se emplearon ligas plásticas que representarían a los amarres que formarían la rejilla cuadrangular (Figura 9a).

Una vez elegido el modelo a materializar, para la etapa constructiva se consiguieron ocho culmos de guadua de un año, en estado verde, con longitudes que oscilaban entre 7.5 m y 9 m. Al tener como propósito construir una *gridshell* de una sola capa, estos culmos fueron partidos con machete,

obteniéndose 48 latillas que tendrían un ancho promedio de 4.5 cm y espesores de 1 cm. Como estas latillas fueron preparadas *in situ*, se debió retirar el exceso de parénquima alojada en los diafragmas de los nudos que componen el culmo. A pesar de que no se requirió el uso de traslapes, por contar con culmos cuyas longitudes eran las necesarias para cubrir el área del proyecto, para optimizar su uso las latillas fueron clasificados según su tamaño. Concluido este proceso, se colocaron en el suelo directrices para la creación de la malla. El módulo de esta retícula se lo construyó de 50 cm por 50 cm, mucho menor al módulo que se manejó en la estructura anterior, siendo necesario acortar la distancia entre sus elementos para garantizar la estabilidad de la estructura (Figura 9b). Tampoco se utilizaron amarres temporales con cinchos de plástico, porque fueron reemplazados por alambre de amarre negro, el cual también cuenta con características flexibles. Esta malla fue construida usando dos tipos de amarres, la primera realizada por los estudiantes en forma de cruz y la segunda realizada por los artesanos de manera cuadrangular.



Figura 9: (a) Extracción de laminillas de guadua para la elaboración de las maquetas *gridshell*; (b) Elaboración de la malla de una sola capa, utilizando el módulo de 50 cm por 50 cm.

Terminada esta etapa, se implantaron estacas de madera en el suelo como marco de retención en el que se asentaría las bases de la *gridshell*. Colaborativamente, se levantó la estructura sin ayuda de grúas o poleas, utilizando solamente la fuerza de cada uno de los miembros.

En la primera erección de la estructura se utilizó guadua joven (un año), lo que provocó complicaciones debido a la insuficiente resistencia necesaria para mantener su estabilidad propia, generando deformación en algunas latillas (Figura 10a). Al verificarse este comportamiento, los estudiantes decidieron reemplazar las latillas deformadas por unas nuevas y colocar riostras triangulares en los extremos para mejorar su estabilidad. El arriostramiento no funcionó debido a que la colocación de estos elementos incrementó el peso de la estructura, evitando que se ponga en pie. La solución consistió en invertir la malla con la finalidad de que el duramen de la latilla quede en la parte interior de la estructura, y la albura expuesta al exterior, mejorando significativamente la estabilidad de esta *gridshell* (Figura 10b).



Figura 10: (a) Producción de deformaciones en las latillas, estructura inestable, (b) Estructura estabilizada al invertir la malla.

Caso de prueba 3: *gridshell* de *Phyllostachys aurea* rolliza

El interés por analizar el comportamiento del bambú dorado en estructuras tipo cáscara surge ante la necesidad de diversificar y potencializar el uso de otras especies de bambú en la industria de la construcción. Considerando los resultados obtenidos en proyectos latinoamericanos con esta especie, se decidió estudiar el desenvolvimiento del *Phyllostachys aurea* en estructuras ligeras, en un taller práctico sin estudiantes. El desarrollo de esta *gridshell* contó con veinte culmos de *Phyllostachys aurea*, de tres años, en estado seco y con longitudes de 5 m y un diámetro que oscilaba entre 3.3 cm a 3.8 cm, características que limitaron el diseño y el análisis de comportamiento. En un primer ensayo previo a la fabricación de la estructura, se determinó la altura máxima de su arco antes de la rotura sobre un culmo de *Phyllostachys*; utilizando un testigo (culmo) de 5.03 m de largo con diámetro de 3.3 cm, al que se le aplicó una primera fuerza lateral y así proceder a medir su proyección en línea recta, que en este caso fue de 4.66 m con una altura en el centro del arco de 84.5 cm. Con la aplicación de una segunda fuerza se logró reducir su medida a 4.45 m en su línea recta, logrando una altura de 1.07 m. La tercera fuerza en carga lateral se aplicó reduciendo su medida a 4.10 m en línea recta y alcanzando una altura de 1.45 m. Mientras que con la aplicación de una cuarta fuerza se generó la rotura logrando una altura de 1.52m (Figura 11)



Figura 11: (a) Ensayo para la obtención de la altura máxima de la curva en culmo de *Phyllostachys*, (b) Rotura del culmo en la cuarta aplicación de fuerza en carga axial

Un segundo ensayo se llevó a cabo para determinar la altura máxima de la curva que se puede lograr con dos testigos traslapados. Con el objetivo de liar dos culmos de similares características en longitud (5.05 m) y diámetro (3.3 cm), se efectuó un traslape de 1.16 m, utilizando para su unión alambre de amarre que se envolvería con vueltas separadas de 1 cm, consiguiendo un largo total del testigo de 9.09 m; el siguiente paso consistió en la aplicación de fuerza lateral hasta reducir su medida en línea recta a 8.09 m. El testigo sufrió una ruptura logrando una altura en arco aproximada de 1.5 m; la ruptura se localizó a 25 cm del punto en el que se termina el traslape (Figura 12a). Ante la anticipación de la ruptura, se realizó un nuevo test incrementando la longitud del traslape a 1.50 m. De igual forma se utilizaron dos culmos de similares características, y alambre como elemento de amarre, con vueltas separadas de 1 cm entre ellas, obteniendo un largo total del testigo de 8.61 m con un diámetro de 3.3 cm. Concluido este procedimiento, se aplicó una fuerza lateral hasta reducir su medida en línea recta a 8.04 m, alcanzando una curva de 1.29 m de altura. En esta prueba la altura máxima se presentó en el centro de la curva (Figura 12b). Se continuó generando fuerzas laterales hasta lograr una medida en línea recta de 7.72 m y consiguiendo una altura del arco de 1.64 m. Una tercera aplicación de fuerza lateral se ejerció hasta alcanzar una distancia en línea de recta de 7.40 m, obteniendo una altura de 1.97 m en su curva. Durante la cuarta fuerza se generó la rotura antes de alcanzar la altura máxima de su curva. Este ensayo nos permitió determinar que el traslape mínimo a utilizarse entre los testigos es de 1.50 m, para que estos puedan tener una mejor flexibilidad.



Figura 12: (a) Primer testigo traslapado: Rotura del culmo a 25 cm del traslape, (b) Segundo testigo traslapado: Medida de altura máxima en el centro del arco.

Una vez finalizados los ensayos, se conformó la cuadrícula en piso para la construcción de esta pequeña *gridshell*. Esta malla estuvo constituida por 4 hileras horizontales y 4 hileras verticales, utilizando culmos traslapados a 1.50 m, con longitudes de 8.60 m y diámetro de 3.5 cm (Figura 13a). El módulo usado fue de 50 cm por 50 cm; los amarres que se emplearon para la unión de los puntos de encuentro fueron realizados con cinchos de plástico sin ajuste máximo, garantizando así el desplazamiento de los culmos durante la compresión. Con ayuda de artesanos, se ejerció la primera fuerza lateral en la grilla, obteniendo una longitud en línea recta de 8.54 m y con una altura en el centro del arco de 0.45 m. Una segunda fuerza lateral redujo su longitud en línea recta a 7.90 m en tanto que su altura en el centro del arco fue de 0.85 m (Figura 13b). La ruptura se generó al ejercer la tercera fuerza, localizándose esta en los extremos del traslape. Su altura en el centro del arco fue menor a la esperada 0.87 m.



Figura 13: (a) Configuración de la malla usando culmos de *Phyllostachys aurea*, (b) Erección de la *gridshell*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experiencias comparativas de las estructuras *gridshell* de bambú

A través del uso de cuadros comparativos, analizaremos los tres prototipos que se construyeron como casos de prueba, para entender el comportamiento de estas especies de bambú en estructuras de *gridshell*. Los factores de evaluación que se emplearon como determinantes para este estudio son la geometría de la malla y la influencia del material.

Geometría de la malla

Desde el punto de vista arquitectónico, la concepción del proyecto nace del boceto manejado por la estética y la funcionalidad, desplazando las consideraciones estructurales para el final de la etapa de diseño. Durante la fase de la búsqueda de la forma, el desarrollo de estructuras tipo *gridshell* incorpora el análisis del comportamiento estructural de sus componentes, optimizando el procedimiento de diseño al obtener un producto con calidad espacial y estructural. En los tres casos de prueba, la búsqueda de la forma se inició estableciendo la geometría de la malla; con modelos físicos a escala 1:200 se establecieron los patrones de las grillas en posición plana. Si bien en principio se formaron geometrías arbitrarias, la definición de un patrón de la grilla que cumpla con las condiciones de tensión permitió determinar la forma de cada estructura (Ver tabla 1).





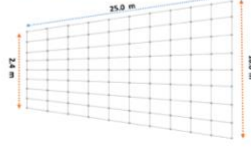
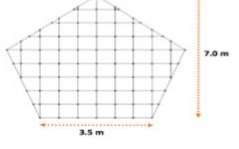
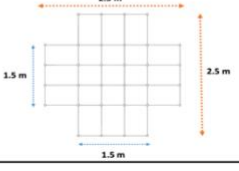
Criterio de evaluación	Gridshells en bambú		
	<i>Dendrocalamus asper</i>	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	<i>Phyllostachys aurea</i>
Búsqueda de la forma			
Modelos a escala			
Papel milimetrado	✓	✓	✓
Tiras de balsa	✓	✗	✗
Laminillas de bambú	✗	✓	✓
Ligas elásticas	✓	✓	✓
Modelos colgantes		✗	✗
Diseño de la malla			

Tabla 1: Proceso de la búsqueda de la forma para las tres estructuras *gridshell*

Influencia del material de construcción

Los parámetros que motivaron el uso de las *gridshells* de flexión activa no solo se basan en su naturaleza estética, sino además en el uso eficiente de los recursos que permitan ahorrar en tiempo y costos de los procesos constructivos. Por su capacidad flexible, la mayoría de las estructuras de flexión activa han sido construidas con madera. En este tipo de estructuras es prioritario contar con materiales con un bajo módulo de elasticidad ya que proporcionan a las estructuras mayor rigidez fuera del plano y reducción de problemas de estabilidad. Se consideró al bambú como una alternativa viable para la construcción de estos tres casos de prueba por ser un material que ejerce una alta resistencia a la ruptura. Al igual que la madera, las propiedades físico-mecánicas del bambú dependen de su taxonomía, edad, contenido de humedad y diámetro.

Como se mencionó anteriormente, los tres proyectos experimentales tuvieron limitaciones en la obtención del material, un factor determinante para el trazado de la malla y por ende de su forma (ver Tabla 2). La primera construcción realizada en el barrio San Juan contó con latillas de *Dendrocalamus asper* cuyas dimensiones fueron 5.0 m de largo por 3.0 cm de ancho por 1.5 cm de espesor (ancho de pared). Por las delgadas características de la latilla, la malla fue configurada por una doble capa de latillas de bambú de iguales dimensiones, colocadas una sobre otra, pero unidas entres si para crear la acción compuesta. El módulo que definió a la malla quedó de la siguiente manera: el lado angosto con un módulo de 30 cm por 80 cm, mientras que el lado más ancho contó con un módulo de 80 cm por 80 cm. A diferencia de la primera *gridshell*, la segunda estructura realizada en Manta contó con latillas de dimensiones más grandes: 8.0 m de largo por 4.5 cm de ancho por 1 cm de espesor (ancho de pared). Se configuró esta grilla con una sola capa de latillas de *Guadua angustifolia Kunth*, definiendo un módulo simétrico de 50 cm por 50 cm. Para la tercera estructura, se consiguieron cañas de *Phyllostachys aurea* de 5.0 m de largo por 3.5 cm de diámetro promedio y con ancho de pared de 0.3 cm que representa un espesor equivalente al 11.42% de su diámetro exterior. Estas medidas definieron una sola capa de culmos cilíndricos usando un módulo simétrico de 50 cm por 50 cm.







Criterio de evaluación	Gridshells en bambú		
	<i>Dendrocalamus asper</i>	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	<i>Phyllostachys aurea</i>
Material de construcción			
Bambú			
Estado del culmo	Semi seco	Verde	Seco
Edad del culmo	6 años de dad	2 años	3 años
Diámetro del culmo	18 cm	12 cm	3.3 a 3.8 cm
			
Producto obtenido	Latillas	Latillas	Caña cilíndrica
Cantidad del producto	100 unidades	48 unidades	20 unidades
Espesor de pared	1.5 cm	1 cm	0.3 cm
Longitud	5 m	8 m	5 m
Ancho latilla	3 cm	4.5 cm	-
Amarres			
Alambre flexible	80 m	50 m	50 m
Cincho plástico	200 unidades	-	25 unidades

Tabla 2: Disponibilidad del material para la construcción de las tres estructuras de *gridshell*

Para los tres casos de prueba se unieron los elementos que conformaron la malla mediante amarres. Los Casos 1 y 3 contaron con experimentos de prueba usando cinchos de plástico como amarres temporales. En los amarres definitivos del Caso 1 se utilizaron dos materiales, el primero con alambre flexible que amarraron las latillas en forma de cruz, el segundo amarre sirvió como elemento de reforzamiento, por contar con una malla de doble capa. La cabuya (*Agave americana*) al estar compuesta por fibras duras que ayudan a la sujeción de materiales vegetales, permitieron fijar las dos capas colocadas en los extremos de la estructura, así como también en los puntos de intersección. El Caso 2 utilizó únicamente como elemento de amarre al alambre flexible; se utilizaron dos tipos de amarres, unos en forma de cruz y otros en forma cuadrangular. La diversificación de amarres no influyó en el desenvolvimiento de la estructura. Para el Caso 3, fue necesario usar alambre flexible para la realización de traslapes entre los culmos, mientras que para la unión de las intersecciones de la grilla se prefirió usar cinchos de plástico con la finalidad de permitir el movimiento de los culmos durante la compresión (ver Tabla 3).

Una vez que se ha confeccionado la cuadrícula, para el proceso de erección se define el sistema de arrostramiento y las condiciones de soporte que tendrían las *gridshells* (ver Tabla 3). En el Caso 1, para la primera erección se utilizaron arrostramientos momentáneos en forma de cruz, que luego fueron retirados porque se utilizó una segunda capa de latillas, logrando con esto su estabilidad sin necesidad de riostras. Por otro lado, en el Caso 2 inicialmente no se consideró el uso de riostras; al tener materiales provenientes de cañas jóvenes y en estado verde, sus latillas comenzaron a deformarse haciendo indispensable un sistema de arrostramiento. No funcionó este sistema debido a que el incremento de miembros derivó en el aumento del peso de la estructura. La solución de estabilidad para esta estructura fue conseguida al invertir la malla, quedando expuesta la parte interior; la corteza de la latilla, al poseer mayor dureza causada por su alto contenido de sílice, quedó en la parte interior, mejorando la resistencia de la estructura. En el Caso 3, su pequeño tamaño hizo innecesario el uso de riostras.

Obteniendo la forma requerida, estas estructuras se asentaron en diferentes materiales de apoyo (ver Tabla 3). El prototipo del Caso 1, al ser una intervención urbanística temporal, fue asegurado con probetas de concreto, cilíndricas y que podrían ser retiradas fácilmente una vez que la intervención

finalizase. Este tipo de apoyo no resultó ser efectivo, debido a que el peso de la *gridshell* fue mayor al de estos elementos, provocando el colapso de la estructura. A pesar de esta deficiencia, este prototipo se mantuvo en pie por 44 días. Esta *gridshell* cubrió un área de 86 m² con una altura de arco de 4.5 m. Para el Caso 2, los elementos utilizados para fijar la estructura al suelo fueron estacas de madera. Estos soportes funcionaron muy bien ya que las estacas, al ser enterradas, provocó que el empuje realizado por la estructura sea contrarrestado por el empuje de la tierra. El prototipo colapsó a los 19 días. Los soportes que se asignaron para el Caso 3 fueron barras metálicas colocadas en los cuatro extremos de la malla para que ayuden al empuje de esta, mientras se iniciaba el proceso de comprensión y así dar forma a la *gridshell*. La estructura falló el mismo momento en el que se le ejerció la tercera fuerza.















Criterio de evaluación	Gridshells en bambú		
	<i>Dendrocalamus asper</i>	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	<i>Phyllostachys aurea</i>
Proceso constructivo			
Gridshells en bambú			
Amarres	Alambre flexible / cabuya	Alambre flexible	Alambre flexible / cinchos
			
Área	86 m ²	18 m ²	4 m ²
Altura de la curva	4.5 m	Promedio 3.7 m	0.87 m
Arrostramiento	Riostras momentáneas	Riostras momentáneas	Sin riostras
			
Elementos de soporte	Probeta de hormigón	Estacas de madera	Barras metálicas
			
Falla de estructura	Elemento de soporte	Latillas en estado verde (un año)	Caña en estado seco
			

Tabla 3: Proceso constructivo y erección de las 3 estructuras de *gridshell*

CONCLUSIONES

La realización de estos casos de prueba arroja las siguientes conclusiones:

Los talleres de construcción participativa se mostraron como medios de enseñanza-aprendizaje que permitieron a los estudiantes aplicar los conceptos aprendidos y resolver los inconvenientes surgidos durante el proceso constructivo.

La geometría, especialmente el radio de curvatura de los miembros que conforman la retícula juega un papel fundamental en su comportamiento estructural. De allí la importancia de utilizar materiales que sean fácilmente deformables.

El diseño final de los dos primeros casos de prueba, son resultado de un proceso en el que las propiedades geométricas, materiales y de sección de los elementos que conformaron la malla pudieron desarrollarse hasta obtener una *gridshell* eficiente desde el punto de vista arquitectónico, estructural y constructivo.

El tercer caso de prueba construido con *Phyllostachys aurea*, estuvo limitado no solo por el número de culmos que se logró conseguir, sino también por encontrarse estos en estado seco, factor que determinó su baja flexibilidad durante el curvado, ya que aumentó la rigidez de los culmos. Resulta prioritaria la realización de más experimentaciones con esta especie, utilizando culmos con diferentes estados de humedad, edad y diámetros.

Las especies *Dendrocalamus asper* y *Guadua angustifolia Kunth* demostraron una alta capacidad para ser usadas en estructuras de flexión activa. Mientras que, por su estado y edad, en esta ocasión el *Phyllostachys aurea* no contó con dichas cualidades, lo que sugiere la necesidad de experimentar con esta especie en aplicaciones de estructuras *gridshell* de flexión inactivas.

Si bien la estructura efímera correspondiente al caso de prueba 2 se materializó usando bambú en estado verde (no maduro) ya que facilitaba el manejo del material por contar con mayor flexibilidad; su uso (verde) en construcciones va en detrimento de su durabilidad y propiedades mecánicas, por lo que no se recomienda utilizar este material en esas condiciones.

Las investigaciones en marcha con laminados de bambú aplicados en estructuras *gridshell*, al ser elementos prefabricados, no enfrentan problemas como irregularidades del tallo o presencia del nudo. En países como Ecuador, donde los laminados en bambú son costosos por su baja demanda, es conveniente considerar alternativas como es el uso de latillas, una opción económica y sostenible para la realización de estructuras tipo *gridshell*, siempre y cuando se considere la madurez del tallo, la resistencia de la sección de las latillas y el estado de humedad.

Se recomienda, además, realizar estudios que permitan acceder a información de las propiedades mecánicas del *Phyllostachys aurea* para poder determinar la longitud del arco dependiendo del diámetro y largo del culmo.

Expresiones de gratitud

El trabajo descrito en este documento es el resultado de varias experimentaciones constructivas. Los autores desean agradecer a Titi Cedeño, Germán Villareal, Gerardo Cadena, María José Freire, Universidad de Mons y a los estudiantes de arquitectura de la Universidad Central del Ecuador juntamente con los artesanos del sector, quienes fueron los partícipes de la realización del diseño y construcción de estos prototipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Añazco, M.; Rojas, Sebastián. 2015. *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie Guadua angustifolia*. Red Internacional de Bambú y Ratán, INBAR. Quito, Ecuador.
- Chilton, J.; Tang, G. 2017. *Timber gridshells: Architecture, Structure and Craft*. Routledge, New York, USA.
- Douthe, C.; Caron, F.; Baverel, O. 2010. "Gridshell structures in glass fibre reinforced polymers". *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 9, pages 1580-1589.
- Dunkelberg, K.; Otto, F.; 1985. *IL 31, Bambus. IL 31, Bamboo : Bambus als Baustoff / Bamboo as a Building Material. Bauen mit pflanzlichen Stäben / Building with Vegetal Rods*. Kraemer Karl GmbH + Co. Stuttgart Germany
- Dwight, E.; Giles, J. 1994. "The Theoretical Roots of Service-Learning in John Dewey: Toward a Theory of Service-Learning". *Michigan Journal of Community Service Learning*. Fall 1994, Vol. 1, No. 1, pp. 77-85.
- Edemskaya, E. 2014. *Rethinking complexity: steel lattice structures, past and present*. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements of the degree Master of Architecture. The University of Liverpool.
- Fernandes, J.; Kirkegaard, P.; Branco, J. 2016. Tectonic design of elastic timber gridshells. "World Conference on Timber Engineering", Vienna, Austria. Pages 1-10.
- Jen, Y.; Delsalle, M.; Cuong, L. 2010. Shigeru Ban, Japan & Vo Trong Nghia, Vietnam. *FuturArc. The voice of Green Architecture in Asia-Pacific* Volume 4Q, 2010.
- Liddell, I. 2015. "Frei Otto and the development of gridshells". *Case Studies in Structural Engineering*, Volume 4, December 2015, Pages 39-49.
- Londoño, X. 2000. La guadua: un gigante dormido. Conferencia presentada en el seminario "Guadua en la reconstrucción" el 10 a 12 de febrero del 2000 en Armenia, Colombia.
- Peña, C; Cabrera, A.; Caro, E.; Castro, A.; Michelena, E.; Rúgolo, Z.; Soria, P.; Zagare, V. 2015. *Solución Bambú: Guía para el manejo sustentable del género Phyllostachys*. Red Internacional de Bambú y Ratán, INBAR. Tigre, Argentina.
- Pino, F. 2016. "Centro Multiusos en Mannheim. Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha". *Revista Indexada de Textos Académicos Rita* No. 05 (abril). 106-114.
- Rockwood, D. 2015. *Bamboo gridshells*. Routledge, New York, USA.
- Seixas, M.; Bina, J.; Stoffel, P.; Ripper, L.; Moreira, L.; Ghavami, K. 2017. "Active Bending and Tensile Pantographic Bamboo Hybrid Amphitheater Structure". *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure* 58. No. 3 September n. 193. Pages 239-252
- Tang, G. 2013. "Timber gridshells: beyond the drawing board". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction Materials*. Volume 166, Issue CM6, Pages 390-402.
- Wyatt, L. 2009. *The Industrial Revolution*. Greenwood Press. Westport, CT. USA.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Durante el proceso constructivo, la primera *gridshell* de acero doblemente curvada del mundo (Shukhov 1897).

Figura 2: (a) Estructura *gridshell* experimental con madera (Otto 1962), (b) Sala multiuso Mannheim en Timber *gridshell* (Otto 1975), (c) *gridshell* hecha de tubos de cartón para el pabellón japonés (Ban 2000).

Figura 3: Hallazgo de la forma usando modelos físicos (Otto 1973)

Figura 4: Modelo de cadenas colgantes (Isler 1950)

Figura 5: (a) Búsqueda de la forma - Cúpulas de la Sagrada Familia (Gaudí 1882), (b) Modelos físicos realizados por los estudiantes de la UCE.

Figura 6: (a) Presentación de propuestas *gridshell* para la comunidad de San Juan, (b) Prototipos hechos con madera de balsa en escala 1:200

Figura 7: (a) Incisiones en los extremos del bambú para fijar el traslape (Rockwood 2014), (b) Trazado de la retícula en piso.

Figura 8: (a) Amarres hechos con cabuya, (b) *gridshell* finalizada y emplazada en el barrio

Figura 9: (a) Extracción de laminillas de guadua para la elaboración de las maquetas *gridshell*; (b) Elaboración de la malla de una sola capa, utilizando el módulo de 50 cm x 50 cm.

Figura 10: (a) Producción de deformaciones en las latillas, estructura inestable, (b) Estructura estabilizada al invertir la malla.

Figura 11: (a) Ensayo para la obtención de la altura máxima de la curva en culmo de *Phyllostachys*, (b) Rotura del culmo en la cuarta aplicación de fuerza en carga axial

Figura 12: (a) Primer testigo traslapado: Rotura del culmo a 25 cm del traslape, (b) Segundo testigo traslapado: Medida de altura máxima en el centro del arco.

Figura 13: (a) Configuración de la malla usando culmos de *Phyllostachys aurea*, (b) Erección de la *gridshell*.

TABLAS

Tabla 1: Proceso de la búsqueda de la forma para las tres estructuras *gridshell*

Tabla 2: Disponibilidad del material para la construcción de las tres estructuras de *gridshell*

Tabla 3: Proceso constructivo y erección de las 3 estructuras de *gridshell*