



INVESTIGACIÓN

Metodología para determinar esfuerzos de diseño del bambú

Agustín Hernández Hernández

Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

ahh@unam.mx

Investigador titular del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP) de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Su desempeño y experiencia le permitió obtener mención honorífica en la disertación doctoral presentada en diciembre del 2000 en la UNAM. Su convicción ha sido significativa para prolongar la aventura de racionalizar la actividad profesional orientada a obtener resultados que se inscriben fácilmente a la experiencia profesional establecida. Su participación en el proyecto de intervención patrimonial en la catedral metropolitana ha contribuido a cristalizar metas de manera práctica sobre la comprensión de la forma construida y continuar con dicha postura en el seno de la innovación tecnológica en la UNAM y en el ámbito docente de la Especialización en Diseño de Cubiertas de la misma Facultad.

Magdalena Trujillo Barragán

Facultad de Ingeniería, UNAM

trujbar@unam.mx

Es ingeniera mecánico electricista por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con grado de maestría y doctorado en Ingeniería Mecánica, en la subárea de Diseño y Manufactura, también en la UNAM. Actualmente es presidenta de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica AC (SOMIM) en el bienio 2014-2016.

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2015

Fecha de aceptación: 7 de julio de 2015

Resumen

Como todo resultado nuevo, la metodología desarrollada ilustra que los procedimientos no nacen como un análisis definitivo, sino que resultan de un proceso evolutivo que se va nutriendo gradualmente de argumentos analíticos interpretados de manera creativa, los cuales después se ilustran mediante la geometría y que permiten configurar una metodología consciente y segura, capaz de establecer un procedimiento unificado para obtener los esfuerzos de diseño, equivalente al valor modificado de resistencia especificado en las *Normas Técnicas Complementarias* para diseño y construcción de estructuras de madera y del *Reglamento de Construcciones* para el Distrito Federal. En la descripción de resultados se intercalan hallazgos obtenidos mediante pruebas de aplastamiento y estudios de microscopía óptica, ya que el bambú es un material anisótropo, formado por fibras longitudinales unidas por células denominadas parénquima, menos resistentes, por ello el esfuerzo cortante resulta menor paralelo a la fibra.

Durante la historia de la construcción ha funcionado en el género habitacional y tiene gran potencial de integrarse a la arquitectura actual donde algunas variantes se enfocan a cubrir mayores claros y a enriquecer el juego geométrico.

Palabras clave: rectilíneo, anisótropo, precarga, contrapendiente, parenquima, fibra, microscopía, sustentabilidad, torquímetro y aplastamiento

Methodology to determine stress parameters for bamboo

Abstract

As with any new results, the methodology developed in this study shows that procedures are not born from a final analysis, but are the result of an ever-evolving process, gradually nurtured through the creative interpretation of analytical propositions. Geometry was then used to illustrate them, allowing for the design of a comprehensive and reliable methodology, which led to a unified procedure to compute design stress parameters equivalent to modified strength values as defined in the Technical Standards for the Design and Construction of Wooden Structures (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera) of the Building Regulations for Mexico City (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal).

The section on results includes findings derived from compressive tests and optical microscopic analysis. Bamboo is an ani-

sotropic material, formed by long fibers bound by cells called parenchyma, which have less strength; therefore, shear stress is lower in the direction parallel to the fiber. However, throughout the history of construction, bamboo has been a good material for housing, and is useful in modern architecture, when required to cover large spans and combine geometrical shapes.

Key Words: Rectilinear, anisotropic, preload, counter slope, parenchyma, fiber, microscopy, sustainability, torque wrench, compression

Introducción

El presente artículo constituye un avance de investigación del proyecto UNAM-PAPIIT IG401014 denominado “Arquitectura sustentable con definición de patrones de comportamiento estructural en materiales y sistemas estructurales actuales” encabezado por el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura, donde participa también el arquitecto especialista Marcos Javier Ontiveros Hernández. Uno de los objetivos del proyecto consiste en mejorar la experiencia establecida de la construcción con bambú en México, para lo cual se procedió a investigar el estado del arte sobre la conducta estructural del material con el fin de aplicarlo como elemento de diseño durante la formulación de soluciones arquitectónicas coherentes con su comportamiento real. Como ha señalado el profesor emérito de la UNAM Fernando López Carmona:¹

1 Profesor Emérito de la Facultad de Arquitectura de la UNAM y protagonista de la experiencia de los cascarones de concreto en México, donde materializó la forma natural del concreto aplicando geometrías de la del paraboloide hiperbólico.

“deducir la forma natural”, para lo cual se investigaron las propiedades mecánicas contenidas en diversas bibliografías y se registraron en la siguiente tabla, para analizar los valores entre sí, e identificar diferencias importantes que generaron incertidumbre, porque además ninguna fuente consultada describía la metodología empleada durante la deducción de los valores que consigna.

Algo similar ocurrió cuando se investigó el factor de seguridad empleado para calcular estructuras de bambú, lo que condujo a tomar la decisión de hacer nuestras propias pruebas aplicando la normatividad internacional a fin de obtener resultados definitivos. En poco tiempo dicha meta se volvió relevante porque al profundizar en el tema con fin de situarlo en el contexto cultural, se encontró que en este campo

ESPECIE DE BAMBÚ	COMPRESIÓN	TRACCIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	MÓDULO DE ELASTICIDAD	AÑO
Guadua Velutina ^{2 *}	377.4 kg/cm ^{2*}	—	915.6 kg/cm ^{2*}	69.7 kg/cm ^{2*}	202,913 kg/cm ^{2*}	—
Bambusa Vulgaris ³	332 kg/cm ²	927 kg/cm ²	94 kg/cm ²	34 kg/cm ²	184,949 kg/cm ²	1996
Guadua Amplexifolia ^{2 **}	305.3 kg/cm ^{2*}	—	55.3 kg/cm ^{2*}	55.3 kg/cm ^{2*}	181,794 kg/cm ^{2**}	—
Guadua Aculeata ^{2 **}	331.02 kg/cm ^{2**}	—	57.19 kg/cm ^{2**}	62.86 kg/cm ^{2**}	165,256 kg/cm ^{2**}	—
Guadua Aculeata ⁴	719.69 kg/cm ²	1635.29 kg/cm ²	1635.29 kg/cm ²	—	214,772.26 kg/cm ²	2007
Phyllostachys B. Madake	567 kg/cm ²	475.33 kg/cm ²	—	200 kg/cm ²	80,000 kg/cm ²	2010

Estado del arte sobre las propiedades del bambú

* Especie de Tabasco, México

** Especie de Veracruz, México

2 Resultados de las tablas del Instituto de Ecología, Departamento de Productos Forestales y Conservación de los Boques, en la Memoria del 1^{er} Congreso Mexicano de Bambú, diciembre de 2015

3 Tesis de maestría *Análisis del otate (Bambusa Vulgaris) como material estructural*, por Agustín Hernández Hernández, UNAM, 1996, llevada a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

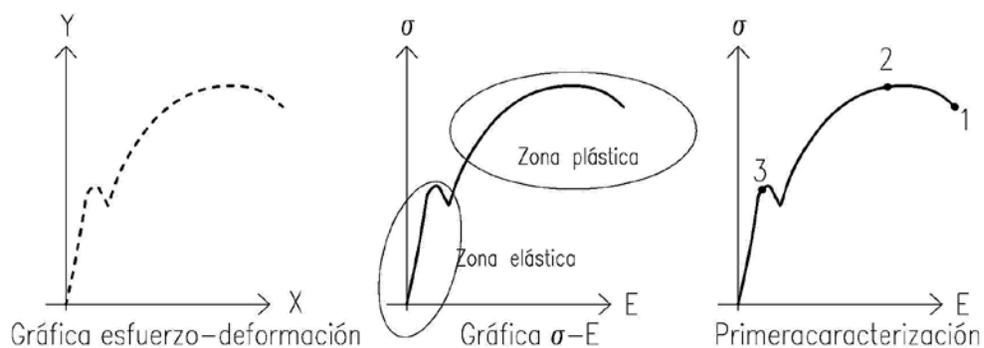
4 Tesis de maestría *Una alternativa constructiva en México* por Carmina Flores Carranza, UNAM, 2009, llevada a cabo en los laboratorios L-1 y L-4 de la FES Aragón, con ayuda del personal técnico responsable, utilizando los bambúes de la especie Aculeata procedente de Los Tuxtlas, Veracruz, 2007.

experimental la referencia ineludible fueron las pruebas que realizó Galileo Galilei en el siglo XVI, contenidas en su publicación titulada *Diálogos*⁵ donde describe el comportamiento estructural de los materiales. Al ensayar una columna invertida con carga creciente en el extremo inferior y al experimentar una viga en voladizo, también empezó a explicar el concepto de momento flector mediante proporciones geométricas registradas por incrementos graduales de carga.

Desde entonces dichos principios mecánicos fundamentaron la investigación que de manera más analítica dio a conocer en 1676 el científico inglés Robert Hooke, quien formuló lo que se conoce en la actualidad como la Ley de Hooke, aplicable al investigar los materiales empleados en la construcción, la cual determinó de manera experimental, al usar el eje de las ordenadas como escala de los esfuerzos y las abscisas para registrar las deformaciones y al incrementar la carga de manera

gradual creó gráficas conformadas por segmentos rectilíneos, que asocian con gran precisión cada punto al sistema de coordenadas cartesianas, para vincular de manera directa, tanto al esfuerzo como a la deformación, cuyas imágenes siguientes ilustran que todos los materiales antes de fallar se deforman.

Durante la interpretación de las gráficas, de manera rápida se distingue una zona plástica al final y otra elástica en el inicio, donde la relación esfuerzo-deformación unitaria resulta lineal, dicha observación atañe tanto a materiales frágiles como a los dúctiles que se suelen distinguir por su capacidad de desarrollar grandes deformaciones antes de fallar, es decir que la ductilidad significa deformación y no rotura, en contraste a lo que ocurre con los materiales frágiles. En función al patrón inicial que exhiben las gráficas que más adelante se describen a detalle, permiten asociar al bambú al grupo de los materiales dúctiles.



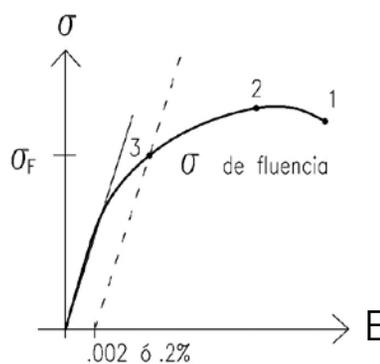
Esquemas para interpretar gráficas esfuerzo-deformación unitaria

⁵ La publicación del manuscrito estructurado en cuatro diálogos, fue realizada en Holanda, en el año 1638, cinco años después de haber sido condenado por herejía.

En función al interés por deducir de manera explícita la conducta del bambú, se consideró relevante distinguir sobre cada gráfica tres puntos característicos como son el esfuerzo último, el máximo y el de fluencia equivalente a una deformación de dos milésimas, que en la práctica suele emplearse como índice de resistencia para identificar la calidad de un material, ya que a ésta sollicitación el material trabaja sin sufrir deformaciones irreversibles. Sin embargo, la prudencia aconseja someter el material a una intensidad menor, llamada esfuerzo de diseño, similar al valor modificado de resistencia que especifican las *Normas Técnicas Complementarias* (NTC) para el diseño y construcción de estructuras de madera. En el campo de la arquitectura, dicho principio ha resultado efectivo por la incertidumbre inherente sobre los procesos constructivos, la calidad de materiales y en la magnitud hipotética de las acciones tanto permanentes como variables durante el desarrollo de los proyectos estructurales.

Por lo que a menor cantidad de dudas el valor modificado de resistencia tendrá una intensidad mayor, es decir, cercano al esfuerzo de fluencia. Aunque parezca clásico, constituye el referente para establecer una seguridad adecuada contra la falla o deformaciones irreversibles excesivas. Por lo tanto, desde el punto de vista técnico, el estado del arte sugiere la necesidad impostergable de definir un valor modificado de resistencia para el bambú existente en México en relación a su propio coeficiente de seguridad “n”.

De acuerdo con la bibliografía clásica,⁶ cuando alguna gráfica de esfuerzo-deformación unitaria no exhibe el límite de fluencia bien definido, se determina mediante el llamado “método del desplazamiento”, que consiste en desplazar la tangente del segmento inicial rectilíneo del 0.2% en dirección de las abscisas y donde se intersecta con la gráfica; se considera como el punto de fluencia y debido a que dicho punto está tan cerca del límite de proporcionalidad, para efectos prácticos se consideran iguales, también porque es donde las gráficas ilustran un cambio de pendiente en forma apreciable.



$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_F}$$

$$Fr = \left(\frac{1}{n}\right)$$

$$Ftu = (Fr) \sigma_F$$

Ilustración del método de desplazamiento aplicado para determinar el esfuerzo modificado de resistencia

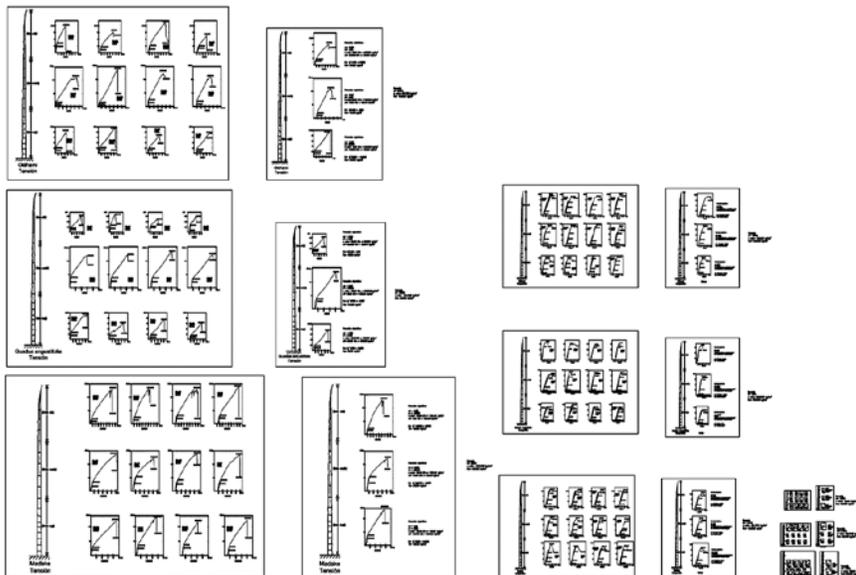
En el quehacer arquitectónico la deformación de 0.2% ó 0.002 mm/mm, resulta algo familiar porque equivale a la relación

6 Por ejemplo el libro sobre *Mecánica de Materiales* de la Universidad de California, Berkeley, EUA, de Edgar Paul Popov, en el cual se estudia dicho fenómeno.

(L/360) que de manera unitaria significa $(1/360) = 0.002$ y que según el Instituto Americano del Concreto (ACI),⁷ es la deformación máxima tolerable al revisar entrepisos porque después de éste valor, el yeso suele agrietarse, por ejemplo para una losa de concreto con un claro de 5 m, la deformación máxima resultaría $(500 \text{ cm} / 360) = 1.39 \text{ cm}$. Como se puede inferir, es a partir de procedimientos clásicos por donde aparecen las analogías que de manera gradual orientaron la investigación del esfuerzo de diseño, equivalente al valor modificado de resistencia que especifica la NTC, para construcción de estructuras de madera del RC para el Distrito Federal.

La etapa experimental realizada acorde a la normatividad internacional ISO/TR22157-2, fue encabezada por la doc-

tora Magdalena Trujillo Barragán del Laboratorio de Plásticos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, apoyada por el ingeniero Adolfo Altamirano Meza, donde se realizaron cuatro especímenes de la parte baja, media y alta de cada tallo, es decir 12 para cada serie de pruebas de tensión, compresión y cortante que suman un total de 36 ensayos por cada especie y como se investigó la *Guadua Angustifolia*, el *madake* con el *oldhamii*, procedentes de Huatusco, Veracruz, resultó un total de 108 pruebas mecánicas complementadas con su debida interpretación. Asimismo es importante comentar que durante el exhaustivo proceso, varios especímenes y pruebas se tuvieron que repetir porque no cumplían con las especificaciones de calidad que caracterizan el trabajo de Trujillo Barragán.



Conjunto de las series de ensayos a tensión, compresión y cortante, donde a cada gráfica le determinaron los tres esfuerzos característicos, el módulo de elasticidad y el esfuerzo modificado de resistencia

7 El American Concrete Institute establece disposiciones para el diseño de estructuras de concreto en Estados Unidos y constituye una referencia importante tanto en México como en América Latina.

Cada terna de esfuerzos básicos que suele hacerse con mayor frecuencia cuando se investiga el desempeño de los materiales empleados en la construcción, se realizaron en una máquina universal marca *Instron* modelo 1335 de 15 ton de capacidad máxima. En conjunto se trata de una información extraordinariamente importante, única en México y que debe valorarse, ya que hasta ahora nadie se había atrevido a realizar, porque el proceso implica mucho trabajo tanto científico como artesanal, después durante el análisis sobre cada gráfica se empezaron a deducir los patrones preliminares de comportamiento, donde también se aprovechó para explicar a los alumnos del laboratorio de estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM que dicha información es materia prima para hacer investigación y los resultados de nuestro trabajo tanto cualitativo como cuantitativo, será de lo más confiable que tendremos en México para que al proponer diseños con bambú, el arquitecto no se exponga a riesgos.

Análisis de gráficas de tensión paralela a la fibra

Una característica que presentan las gráficas, es la zona denominada de inicio o precarga, que se interpreta como un rea-comodo inicial donde ocurren deformaciones importantes ante poca sollicitación, sin embargo en la práctica al investigar el desempeño de los materiales, dicha zona suele despreciarse.

El resultado de las pruebas a tensión fue la primera serie que se empezó a estudiar con el fin de identificar de manera

individual los tres esfuerzos característicos capaces de proporcionar información oportuna para evaluar la conducta del material y desde el primer momento se corroboró que el bambú es un material dúctil capaz de desarrollar grandes deformaciones antes de fallar, debido a que después del rango elástico, acepta deformaciones irreversibles mucho mayores que las elásticas.

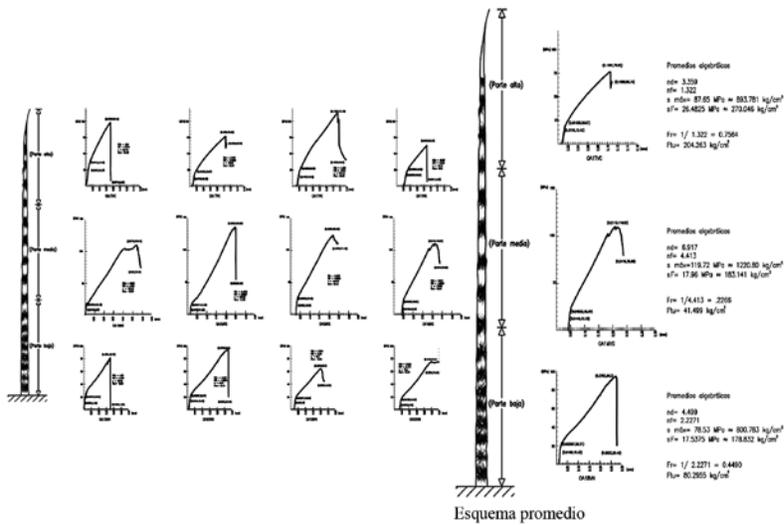
Fue así que, mediante conceptos clásicos se empezó a conformar un procedimiento para obtener el valor modificado de resistencia como una fracción del esfuerzo de fluencia, el cual primero se trató de determinar mediante la observación del cambio de pendiente, pero resultó cuestionable debido a que la magnitud era muy baja en proporción al esfuerzo máximo, es decir se despreciaba gran parte del desempeño del material, que al dimensionar secciones resultarían elementos sobre diseñados, en contraste con la racionalización de materiales que caracteriza al diseño por forma que investiga el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Entonces se decidió implementar un procedimiento más técnico que ofreciera mayor control, por lo que se aplicó el “método del desplazamiento” que consistió en trasladar de forma paralela la tangente del segmento inicial rectilíneo, un intervalo equivalente a una deformación de 0.2% en dirección de las abscisas. Dicho procedimiento permitió definir esfuerzos de fluencia con una intensidad aceptable.

Después se calculó el coeficiente de seguridad “n”, que suele ser siempre superior a la unidad, de manera que con éstos valores numéricos, el factor de resistencia

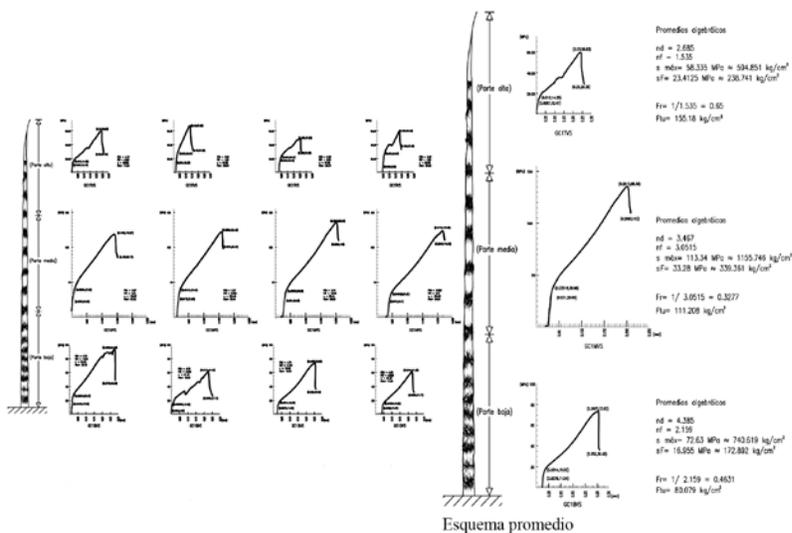
“Fr”, resultó acorde a la propuesta de reconocer que, es positivo ser conservador para alejarse de la falla, pero no tanto. Finalmente ambos números teóricos, permitieron definir el valor modificado de resistencia a tensión.

Como síntesis para el análisis de cada serie de doce gráficas, se identificó el

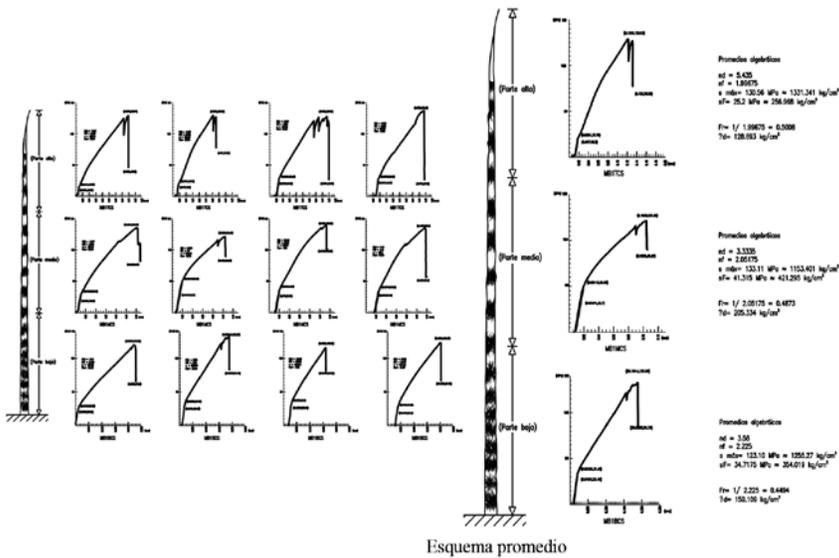
patrón de comportamiento para la parte baja, media y alta y se consignaron en un esquema contiguo diseñado para presentar de manera individual, las medias aritméticas que después permitieron calcular promedios para cada especie, así como lo revelan las tres siguientes figuras.



Gráficas de esfuerzo-deformación unitaria, a tensión paralela a la fibra de la especie *oldhamii*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria, a tensión paralela a la fibra de la especie *guadua angustifolia*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria, a tensión paralela a la fibra de la especie *madake*

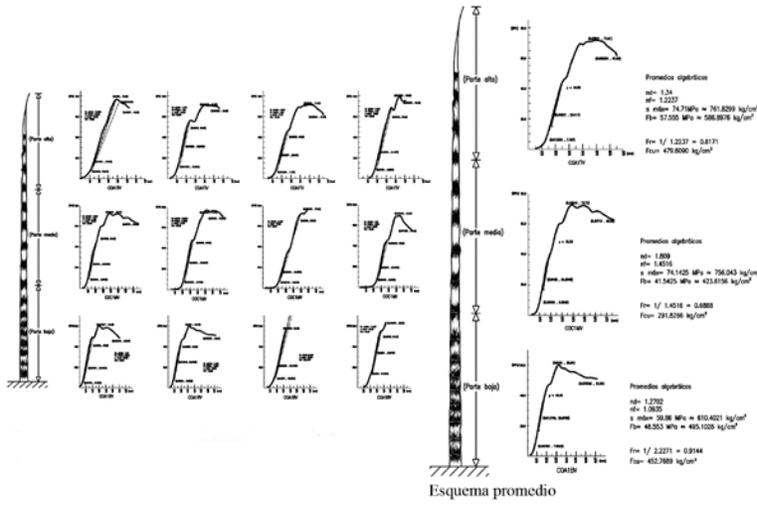
Análisis de gráficas de compresión paralela a la fibra

Cuando llegó el momento de analizar las gráficas que revelan el desempeño a compresión del bambú, se pensó en la posibilidad de aplicar el procedimiento empleado en las gráficas de tensión, sin embargo se encontró un patrón singular debido a la presencia de una contra pendiente localizada en la parte intermedia de la zona elástica, que en principio condujo a obtener esfuerzos de fluencia mayores en magnitud y deformación que los esfuerzos máximos identificados durante la caracterización inicial.

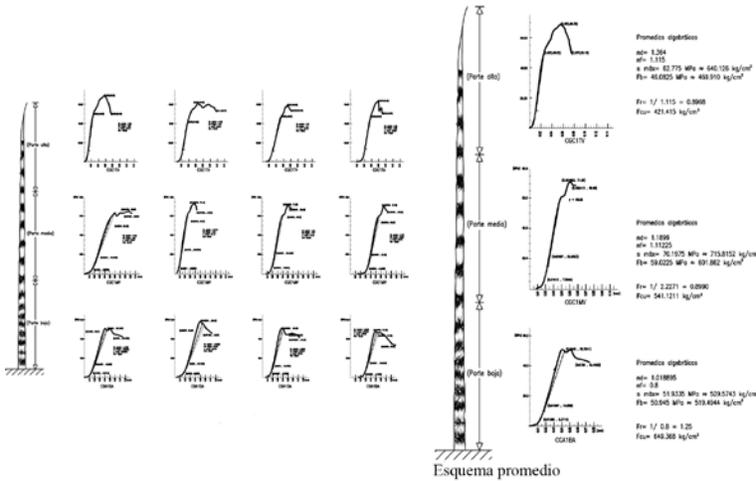
Ante éste escenario con resultados altos sin margen de seguridad, se optó por reducir el intervalo de desplazamiento a la mitad, como una estrategia decisiva al trasladar ahora la tangente del segmento inicial rectilíneo del 0.1%, en sentido

positivo, que equivale también a la mitad de la deformación usual en metales. Dicha decisión permitió obtener puntos de fluencia con una mejor proporción en relación al esfuerzo máximo.

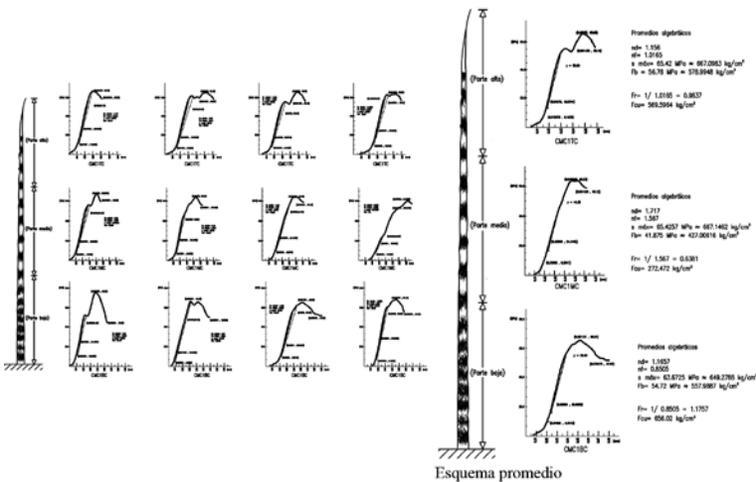
Es importante comentar que durante el proceso de investigación, se pudo haber continuado mediante un procedimiento más rápido, al establecer el punto de fluencia “a ojo”, donde cada gráfica exhibe un cambio de pendiente apreciable, sin embargo se decidió proceder de manera más cuantitativa, con el fin de configurar una metodología explícita, basada en conceptos geométricos, donde cada resultado puede ser evaluado de manera integral. Finalmente al aplicar éste método alternativo, fue posible conseguir valores modificados de resistencia de magnitud razonable contra la falla, para diseñar elementos estructurales donde predominen esfuerzos de compresión.



Gráficas de esfuerzo-deformación unitaria, a compresión paralela a la fibra de la especie *oldhamii*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria, a compresión paralela a la fibra de la especie *guadua angustifolia*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria, a compresión paralela a la fibra de la especie *madake*

La circunstancia de implementar adecuaciones al análisis variando la magnitud de desplazamiento, se hizo después de interpretar que un elemento sometido a compresión ininterrumpida a través del tiempo, experimenta un cambio prematuro que produce un reacondicionamiento suave como fenómeno de tipo plástico que permite seguir desarrollando resistencia debido a la capacidad birresistente de las fibras, sin embargo estas decisiones abren directrices de investigación, probablemente exploradas en otras disciplinas con otros materiales.

Análisis de gráficas de cortante paralelo a la fibra

Al momento de empezar a examinar esta tercera familia de gráficas, se trató de aplicar los artificios empleados con antelación. Con el fin de seguir una sola metodología, sin embargo la sorpresa fue que el patrón de estas gráficas diferiría respecto a lo que se había trabajado hasta ahora, debido a la presencia de un quiebre en la zona elástica y para continuar, se procedió a revisar algunas consideraciones geométricas fundamentales con el fin de estar en condición de tomar nuevas decisiones.

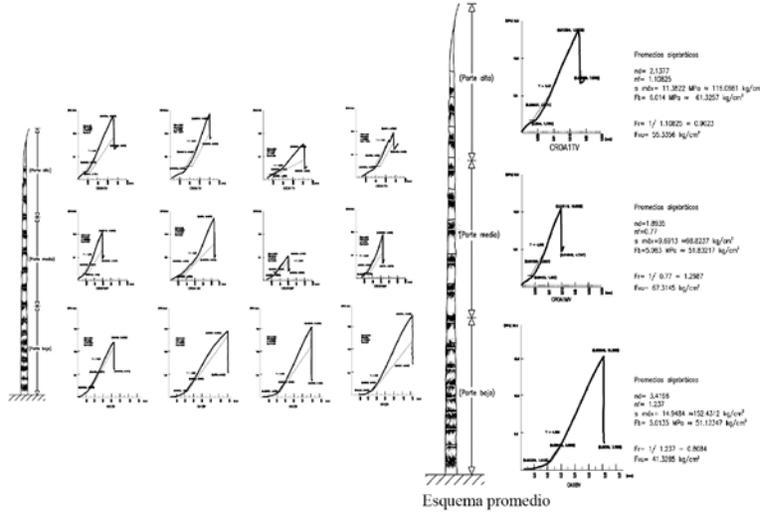
Por lo general los diagramas de esfuerzo-deformación se configuran con segmentos rectilíneos y la pendiente positiva de mayor valor se localiza en la parte inicial, que disminuye gradualmente hasta llegar a cero y cambia de signo previo al punto de ruptura. A partir de esta generalidad suele caracterizarse a los materiales apoyándose estrictamente en el vínculo intrínseco que exhibe la tangente

de cada segmento en todo el desarrollo de cada gráfica.

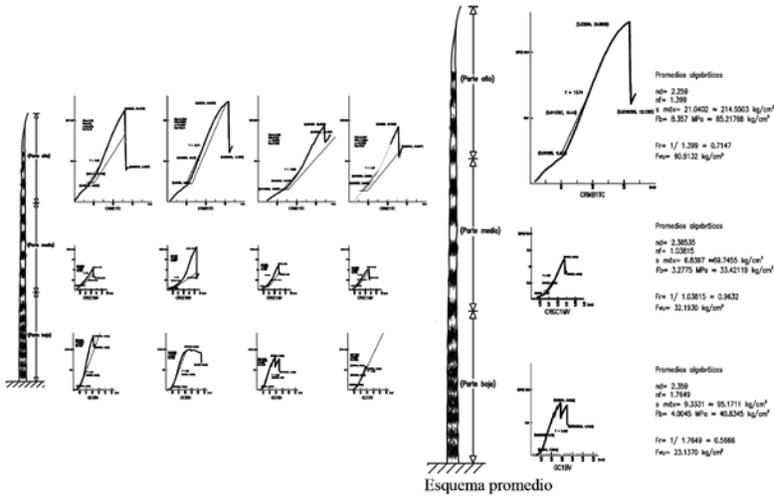
Para este caso la interpretación se hizo analizando como disminuye la pendiente de cada elemento diferencial, sin embargo al seguir hacia adelante, se encontró un punto donde se pierde el patrón inicial y aparece un quiebre a manera de punto de inflexión. Entonces al aplicar el procedimiento empleado hasta ahora, el punto de fluencia resultaba cercano al esfuerzo último, es decir, se salía totalmente del rango elástico.

Después se hizo una interpretación desde la óptica de las deformaciones, es decir que primero el material registra una deformación inicial, luego con carga ininterrumpida presenta repulsiones que modifican el patrón inicial, a manera de flujo plástico para alcanzar el esfuerzo máximo. Con esta teoría y extrapolando conceptos esencialmente geométricos, se procedió a determinar la mediatriz de la deformación inicial, después se decidió calcular la subtangente del segmento rectilíneo inicial y se trasladó sobre las abscisas 0.1%, pero ahora en sentido inverso.

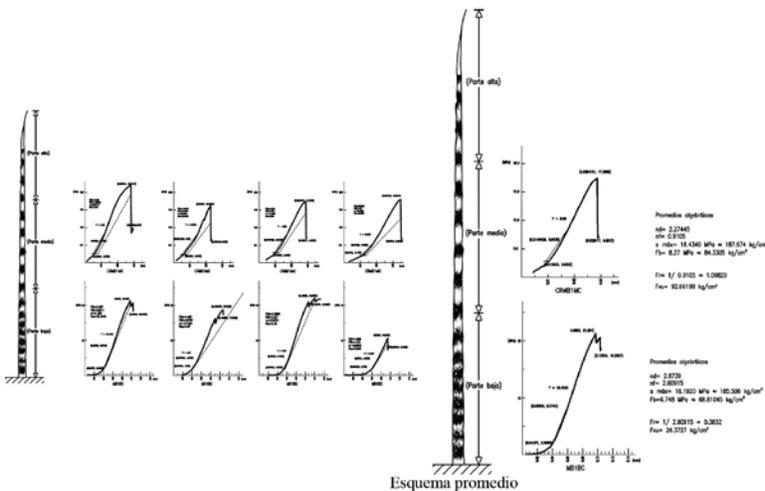
Con este artificio se cumplió la meta de establecer el esfuerzo de fluencia con la suficiente precisión en las gráficas de cortante, apoyándose en la subtangente como variable auxiliar, la cual permitió ilustrar el lenguaje analítico de manera suficientemente explícita, considerando las deformaciones diferidas atribuidas a la falla prematura del parénquima, de manera que los esfuerzos resultaran inferiores al esfuerzo máximo, es decir permite contar con un margen de seguridad razonable asociado a la deformación de uno al millar.



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria a cortante paralela a la fibra de la especie *oldhamii*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria a cortante paralela a la fibra de la especie *guadua*



Gráficas esfuerzo-deformación unitaria a cortante paralela a la fibra de la especie *madaka*

Por supuesto que el proceso de investigación no trata sobre problemas específicos de tangentes, sin embargo ante la combinación de mecanismos encontrados, se tenía que ser algo creativo debido a la poca experiencia que existe para definir los valores modificados de resistencia del bambú. Por lo que se consideró importante formular una explicación detallada sobre la metodología aplicada, así como las variantes empleadas basadas en la geometría de cada gráfica.

Módulo de elasticidad

Otra propiedad que se determinó primero de manera individual y después por cada serie según las especies investigadas, fue el módulo de elasticidad que estableció desde el año de 1807 el científico inglés Thomas Young, el cual se reconoce como la habilidad del material a deformarse

elásticamente en el desarrollo de su rigidez intrínseca para que una estructura se desempeñe acorde al proyecto estructural y en la nomenclatura convencional se designa con la letra “E”.

A la luz de éstas ideas, el procedimiento implementado para calcular dicha constante elástica, fue con la pendiente de la zona inicial de cada gráfica, es decir se trata del módulo de elasticidad tangente correspondiente a la primera carga. El cual permitió determinar oportunamente tanto resistencias como deformaciones elásticas, ya que al calcular diversas estructuras se buscaba que los materiales, no superasen sus límites elásticos, con el fin de que pudiesen recuperar su geometría al suprimir determinado sistema de acciones, como lo señala el artículo 151, del Título Sexto sobre la seguridad estructural de las construcciones, del RC para el Distrito Federal.

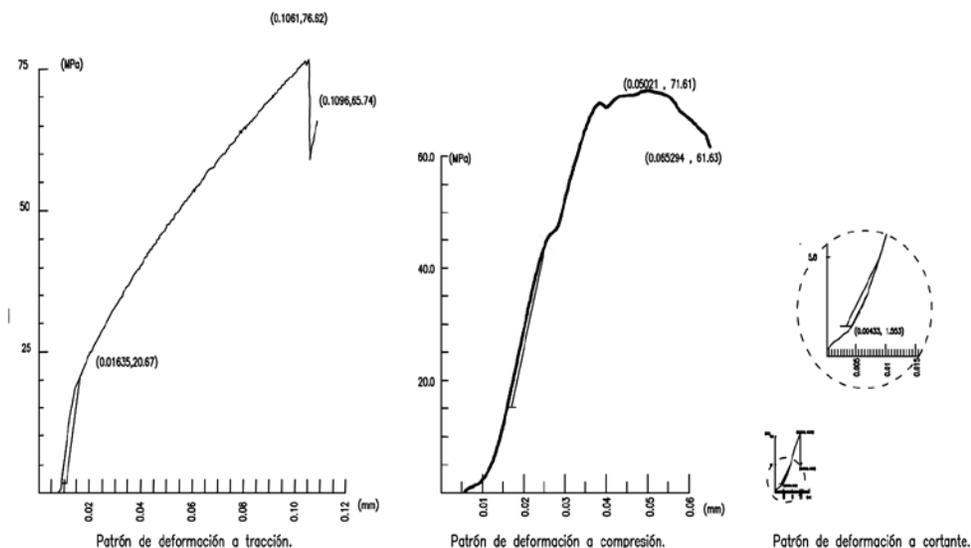
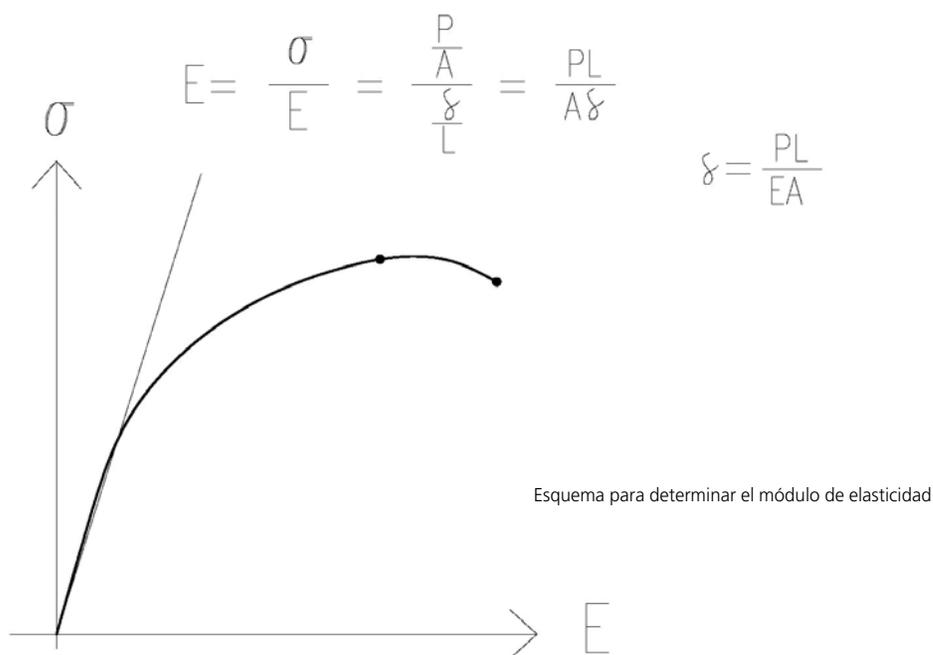


Ilustración de la metodología empleada para definir el esfuerzo de fluencia



Resultados cuantitativos y cualitativos

Como ya se puede inferir, la metodología desarrollada se basó en la geometría de los diagramas, vinculada con la conducta del material donde se manejó la pendiente como herramienta para solucionar circunstancias específicas, sobre complejidades analíticas, por lo que se tomaron decisiones fundamentadas en razones geométricas. Con ésta actitud se trató de deducir los valores modificados de resistencia de la mejor forma, sobre las tres especies de bambú que en los últimos años se emplean de manera progresiva en México para materializar diferentes géneros de construcción.

Como síntesis de esta investigación, se diseñó una tabla con los resultados cuantitativos completamente nuevos, dirigido

especialmente al campo del diseño arquitectónico y estructural con el fin de contribuir al desarrollo técnico de la construcción con bambú, vinculada a los géneros que impone la actualidad. Para efectos de cálculo, estos valores modificados de resistencia varían de manera natural según la especie y por lo que, empeñarse en ensayar las mismas especies cultivadas en otras regiones del país, sería ocioso.

En la primera columna se encuentran las especies investigadas procedentes de Huatusco, Veracruz, en México, después las subsecuentes consignan los resultados sobre esfuerzo máximo, de fluencia y de valor modificado de resistencia, el cual es fundamental para que los elementos de bambú trabajen en condición segura.

Existió una circunstancia más debido a las condiciones de respuesta intrínseca del material: respecto al módulo elasticidad,

se tomó la decisión de presentar el valor correspondiente al esfuerzo de tensión y al de compresión, con el fin de contribuir impulsar aplicaciones más precisas, asimismo confirman la condición anisótropa del bambú.

Respecto a los resultados cualitativos, como producto del seguimiento escrupuloso de la investigación, constituyen un nuevo tema que ofrece éste artículo, porque en ocasiones al cálculo analítico se le escapan variables que sólo identifica la observación directa, por ejemplo durante todo el proceso de análisis, al caracterizar cada patrón de comportamiento, se identificó que la *Guadua Angustifolia* presentaba mayor dispersión de resultados. Esta aseveración se ilustra en la gráfica siguiente, donde se consignan dos esquemas promedio a cortante, uno de *Oldhamii* que exhibía un comportamiento sistemático en todo el desarrollo del tallo y el otro de *Guadua Angustifolia* que registra un desempeño radicalmente distinto en cada intervalo, como si se tratara de tres materiales diferentes.

Al evaluar este ejemplo, numéricamente ambos promedios pueden resultar similares, sin embargo cualitativamente la *Guadua angustifolia* da sorpresas y de ahí la desconfianza que aún persiste para proponer al bambú como material estructural, por su parte el *oldhamii* al registrar un comportamiento más uniforme, ofrece mejores cualidades para la construcción. Dicho escenario puede contribuir en el campo de las aplicaciones a superar las fronteras de lo establecido, a la luz de los patrones de comportamiento de cada especie.

Aunque el hallazgo fundamentado en la dispersión de resultados, se identificó en varios ensayos, las gráficas de esfuerzo cortante lo exhiben de manera más clara, asimismo vale la pena mencionar que ésta conclusión sorpresiva coincide con la respuesta encontrada durante las pruebas de aplastamiento realizadas con torquímetro electrónico al estudiar diferentes técnicas de unión, efectuadas en otra línea activa de investigación.

Es importante comentar que desde el inicio de la etapa experimental, Trujillo

Especie	Esfuerzo a tensión paralelo a la fibra				Esfuerzo de compresión paralelo a la fibra				Esfuerzo de cortante paralelo a la fibra		
	σ_{max} (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	f_u (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	σ_{max} (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	f_{cu} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	σ_{max} (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	f_{vu} (kg/cm ²)
Oldhamii	971.8	210.673	109	45850.9	709.4	502.87	408	51492.98	61.22	28.38	27.33
Guadua Angustifolia	948	256.12	95.6	53282.14	622.7	560.68	525.49	50098.91	63.24	26.58	19.37
Madake	1246.67	344.09	246.64	56736.7	661	521.33	499.36	69871.66	93.37	38.3	29.76

Donde:

σ_{max} = Esfuerzo máximo

σ = Esfuerzo de fluencia del bambú

f_u = Valor modificado de esfuerzo a tensión paralelo a la fibra

f_{cu} = Valor modificado de esfuerzo a compresión paralelo a la fibra

f_{vu} = Valor modificado de esfuerzo cortante paralelo a la fibra

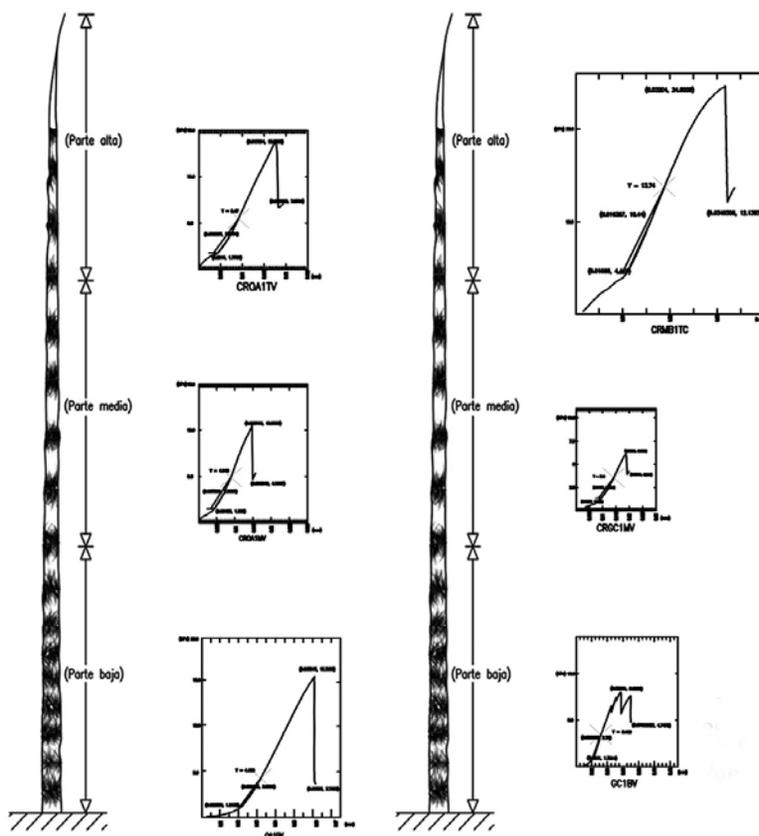
E = Módulo de elasticidad

Síntesis de resultados cuantitativos

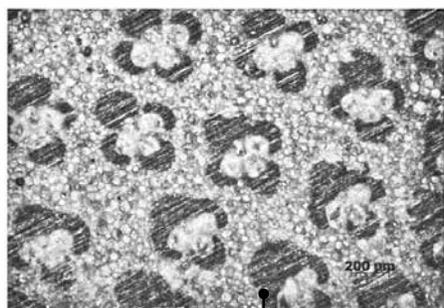
Barragán propuso realizar estudios de microscopía electrónica (pruebas físicas), con el fin de investigar los patrones de comportamiento de cada especie, en relación a la estructura de sus fibras, su distribución y la coexistencia de distintos diámetros. Ante dicha circunstancia participó el ingeniero Jorge Romero Hernández, quien apoyó para que cada serie de pruebas mecánicas se complementa con imágenes microscópicas que de manera preliminar demuestran que el bambú es un material anisótropo, es decir es monolítico pero heterogéneo.

Acorde a la norma ISO/TR22157-2, a cada probeta se le determinó el contenido de humedad con su densidad, ahora

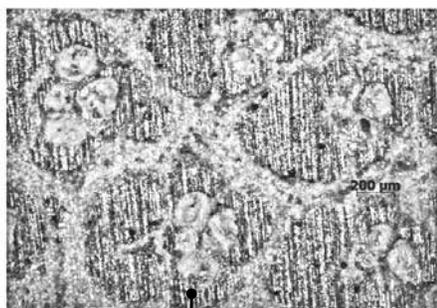
al interpretar la información de éstas variables, se descubrió que coincide con nuestras aseveraciones realizadas sobre la condición de respuesta mecánica, revela que la *Guadua Angustifolia* contiene mayor cantidad de parénquima en contraste al *Oldhamii* que exhibe una mayor cantidad de fibras y es importante señalar que durante la etapa experimental, el *Oldhamii* siempre registró mayor peso específico. Así la microscopía que empezó como una curiosidad, adquirió un valor representativo para garantizar la claridad expositiva de los resultados porque de manera natural dicha técnica ilustró de manera rápida las señales de aleatoriedad.



Resultados cualitativos que advierten la aleatoriedad entre la especie *oldhamii* y *guadua angustifolia*



Guadua Angustifolia
Sección baja, entrenado
Densidad: 655 Kg/m³
Humedad: 12.30%



Oldhamii
Sección baja, entrenado
Densidad: 790 Kg/m³
Humedad: 10.97%

Resultados cualitativos fundamentados
en las imágenes de microscopía óptica

Una circunstancia que prevalece al evaluar una investigación, es que produzca un impacto que contribuya al bienestar social, lo cual conduce a poner en perspectiva la aplicación práctica de éstos resultados teóricos, los cuales tienen el poder especial de cambiar el concepto de la caracterización del bambú, de un proceso lento y meticuloso a un método práctico y versátil mediante el dominio de los diferenciales numéricos como referentes que aporta ésta contribución, como fruto del trabajo en equipo entre la Facultad de Arquitectura y la Fa-

cultad de Ingeniería de la UNAM. Es decir, que en lugar de realizar pruebas destructivas de investigación, que requieren tiempo y dinero que en ocasiones no se disponen, ahora con los patrones de comportamiento predecibles, es posible caracterizar al bambú estructural *in situ*, de manera versátil mediante su densidad, al implementar mediciones con báscula, ya que el bambú más pesado registró mejor desempeño estructural, lo cual puede ayudar a tomar decisiones de obra sobre supervisión o control de calidad del material. ▲■

Bibliografía

- Arnal Simón, Luis, Máx Betancourt Suárez. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. México: Trillas, 2012
- Hernández Hernández, Agustín. Análisis del Otate Bambusa vulgaris como material estructural. Tesis de maestría. Facultad de Arquitectura, UNAM 1996
- Hernández Hernández, Agustín. Estado del arte de la construcción de la guadua en México. Bogotá, Colombia. II Simposio Internacional de la Guadua y el Bambú. 2014
- Heyman, Jacques. Análisis de estructuras, un estudio histórico. Madrid, España. Instituto Juan de Herrera, 2004
- Oliva Salinas, Juan G., Agustín Hernández H, Marcos J. Ontiveros H., y Magdalena Trujillo B. Bamboo Architecture, New Proposals for Sustainable Design. Brasilia, Brazil. IASS-SLTE 2014
- Peschard, Eugenio. Resistencia de materiales. México. UNAM, 1992
- San Martín Córdova, Iván, Mónica Cejudo Collera, comps. Teoría e Historia de la Arquitectura, pensar, hacer y conservar la arquitectura. Facultad de Arquitectura de la UNAM. México. 2012