

## METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN GUADUA ANGUSTIFOLIA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE ESFUERZOS ADMISIBLES

### *DESIGN METHODOLOGY FOR STRUCTURES THAT USE GUADUA ANGUSTIFOLIA AS STRUCTURAL MATERIAL BY ALLOWABLE STRESSES*

Patricia Luna, Caori Takeuchi, Gustavo Granados, Fabian Lamus, Jorge Lozano  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia)

#### Resumen

Desde épocas precolombinas la guadua se ha venido usando en Colombia como material de construcción; sin embargo, el empleo de materiales industrializados como el concreto y el acero, sumado a la falta de una normatividad para el diseño de estructuras en guadua, han hecho que su uso sea limitado y restringido. Por tal razón se hace indispensable la introducción de parámetros para el diseño sísmico resistente de construcciones en guadua, que incluyan la definición de valores de esfuerzos admisibles. Este trabajo presenta la metodología de diseño de estructuras en guadua establecida durante la ejecución del proyecto “Validación de la Guadua Angustifolia como material estructural para diseño, por el método de los esfuerzos admisibles”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y ejecutado por la Universidad Nacional desde agosto de 2008, cuando no existían normas para el diseño con guadua rolliza. La metodología de diseño por el método de los esfuerzos admisibles está basada en la mecánica estructural, en la norma ISO 22156 Bamboo Structural Design y en diferentes investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional.

**Palabras clave:** guadua, parámetros de diseño, esfuerzos admisibles

#### Abstract

Guadua Angustifolia Kunth has been used in Colombia as construction material for centuries; however, the employ of industrialized materials as concrete and steel, added to the lack of normalized and standardized design procedures of guadua structures, have made that its use is limited and restricted. For that reason, it is mandatory the launch of normalized parameters for seismic resistant design of guadua structures, which include the definition of allowable stresses values. This article presents the structural design methodology for guadua structures established during the execution of the project “Validation of Guadua Angustifolia as a structural material for design, by the allowable stresses method”, which has been financed by the Ministry of Agriculture and Rural Development of Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia) and carried out by the Universidad Nacional de Colombia, since August 2008 when there were no standards for the design with raw bamboo. The design methodology is based on structural mechanics, the ISO 22156 Bamboo Structural Design and different research works at national and international level.

**Keywords:** guadua, parameters of design, allowable stresses

## Introducción

Los diferentes sismos registrados en la historia colombiana y principalmente el ocurrido en el año de 1999 en la ciudad de Armenia, han demostrado el buen desempeño sísmico de estructuras construidas con guadua (Jiménez, 1999), pero también han hecho evidente los errores cometidos por su utilización inadecuada. Por tal razón se hace indispensable la introducción de parámetros estandarizados para el diseño sismo resistente de este tipo de estructuras, que incluyan la definición de valores de esfuerzos admisibles y exijan un control de calidad del material usado durante la construcción.

Los estudios adelantados en Colombia para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del bambú *Guadua Angustifolia* datan desde la década de 1970 con los trabajos de Merino, *et al.* (1972); Hidalgo (1978); Martín y Mateus (1981); Carvajal, *et al.* (1981); Trujillo y Peláez (1983), entre otros, pero los valores obtenidos por ellos no pueden ser comparados y analizados estadísticamente debido a que en esa época no existían procedimientos normalizados para la ejecución de los ensayos. En el año de 1999 (INBAR, 1999), fue publicado un manual para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del bambú que sirvió de base para la realización de investigaciones posteriores con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión paralela a la fibra (Uribe y Durán, 2002; Prada y Zambrano, 2003), la resistencia al corte paralelo a la fibra (Acuña y Pantoja, 2005), el módulo de elasticidad a compresión (González, 2006), entre otros.

Actualmente se cuenta con pocas referencias de normativas aplicadas al diseño en guadua; en el año 1998 la Norma de Diseño Sismo Resistente NSR-98 (AIS, 1998), en el capítulo E-7 contempla el uso de la guadua como parte esencial para la conformación de muros de bahareque encementado pero no establece parámetros de diseño de estructuras usando guadua rolliza como material estructural; en el año 2004 la norma ISO 22156 (ISO, 2004) estableció una metodología para el diseño de estructuras en bambú por esfuerzos admisibles y por resistencia última, sin embargo, no especifica valores admisibles o de resistencia última; en el año 2006 el ICONTEC publica la Norma Técnica Colombiana NTC5407

(ICONTEC, 2006) en la cual se hace una descripción cualitativa de las diferentes uniones que pueden ser usadas para la conformación de estructuras en guadua. Solo hasta el año de 2010 la guadua fue reconocida como material estructural en Colombia, siendo incluida en el nuevo Reglamento de Diseño Sismo Resistente NSR-10 en el Capítulo G.12, estableciendo los requisitos de diseño estructural para edificaciones que usan *Guadua Angustifolia* Kunth como material principal limitando su uso a estructuras de vivienda, comercio, industria y educación con altura máxima de dos pisos (AIS, 2010). Para la redacción de este capítulo se utilizó como material base el documento “Guías de diseño para estructuras en *Guadua Angustifolia* Kunth” producto del proyecto “Validación de la *Guadua Angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de los esfuerzos admisibles” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia.

La metodología de diseño presentada a continuación establece los requisitos mínimos de calidad, diseño y construcción de sistemas estructurales en guadua rolliza para cubierta y pórticos espaciales arriostrados con diagonales de altura máxima de 7m a la cumbre; en el caso de pórticos sin diagonales, éstos deberán soportar solo cargas verticales sin sobrepasar una altura de 3m. Consta de las siguientes partes: requisitos generales, combinaciones de carga, valores característicos, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad modificados, diseño de elementos a flexión, diseño de elementos solicitados por fuerza axial, diseño de elementos solicitados por flexión y carga axial.

## Requisitos generales

La guadua es un material natural y por lo tanto sus propiedades físicas y mecánicas varían de acuerdo con su edad; según estudios realizados (Hidalgo, 2003), guaduas con edades entre 3 y 6 años se consideran maduras o “hechas”, es decir, su resistencia está completamente desarrollada y son aptas para la conformación de elementos estructurales. De igual forma cada guadua utilizada en la construcción de edificaciones debe contar con algún procedimiento de preservación para conservar sus características y

propiedades a lo largo del tiempo; los procedimientos de preservación permitidos son los contemplados en la Norma Técnica Colombiana NTC5301 (ICONTEC, 2007).

Debido a que la guadua es un material higroscópico (atrae agua), es susceptible de cambios dimensionales y su resistencia se ve afectada de acuerdo con la variación de su contenido de humedad; así, el contenido de humedad de los culmos de guadua en el momento de la construcción debe estar cercano al contenido de humedad de equilibrio del lugar donde será usada, sin sobrepasar el 20% ni ser inferior al 10%. Esta práctica trae entre otros los siguientes beneficios: disminución de los cambios dimensionales y de forma de los culmos, aumento de la resistencia mecánica, disminución de la masa y por tanto de la densidad de los culmos, tornándolos en un material liviano apto para la construcción de estructuras sismorresistentes y aumento de la resistencia biológica de los culmos, disminuyendo su vulnerabilidad ante la pudrición y manchas causadas por hongos y mohos.

### Combinaciones de carga

Todos los elementos de la estructura deberán estar diseñados, construidos y empalmados para resistir los esfuerzos provenientes de las combinaciones de carga de servicio presentadas en las ecuaciones (1) a (10) (AIS, 2009).

$$D \quad (1)$$

$$D + L \quad (2)$$

$$D + (L_r \text{ o } G_r) \quad (3)$$

$$D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G_r) \quad (4)$$

$$D + W \quad (5)$$

$$D + 0.7E_s \quad (6)$$

$$D + 0.75W + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G_r) \quad (7)$$

$$D + 0.75(0.7E_s) + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G_r) \quad (8)$$

$$0.6D + W \quad (9)$$

$$0.6D + 0.7E_s \quad (10)$$

donde:

$D$  = carga muerta que incluye el peso propio de los elementos, peso de todos los materiales de construcción incorporados a la edificación y que son constantemente soportados por la estructura y el peso de equipos permanentes.

$L$  = carga viva debida al uso de la edificación que incluye las cargas debidas a equipos móviles.

$L_r$  = carga viva sobre la cubierta.

$G_r$  = carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento.

$W$  = carga de viento calculada de acuerdo al capítulo B.6 de la NSR-98.

$E_d$  = fuerza sísmica de diseño, calculada como  $E_d = F_s/R$ , donde  $F_s$  es la fuerza sísmica calculada de acuerdo a los requisitos del Título A de la NSR-98 y  $R$  corresponde al coeficiente de capacidad de disipación de energía a ser empleado en el diseño, afectado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura  $\phi_a$  y en planta  $\phi_p$  ( $R = \phi_a \phi_p R_o$ ); el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico  $R_o$  será igual a 1.00. Los valores de los coeficientes  $\phi_a$  y  $\phi_p$  corresponden a los establecidos en las Tablas A.3-6 y A.3-7 del Título A de la NSR-98. El valor de  $R_o$  podrá ser un valor diferente de 1.00, pero no mayor de 2.00, siempre que esté debidamente sustentado por medio de ensayos.

### Valores característicos, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad

La tabla 1 presenta los valores característicos y la tabla 2 los valores de esfuerzos admisibles para diferentes sollicitaciones que serán usados para el diseño de los diferentes elementos de la estructura, presenta valores para diferentes condiciones de carga, en donde la fila A corresponde a los valores de esfuerzos admisibles para carga muerta, la fila B para carga muerta más carga viva y la fila C para carga muerta más carga viva más carga de viento o sismo.

Tabla 1. Valores característicos (MPa)

Flexión $F_{kb}$	Tensión II $F_{kt}$	Compresión II $F_{kc}$	Tensión $\perp$ $F_{kp}$	Corte II $F_{kv}$
37.4	40.7	20.3	1.7	3.5

Tabla 2. Esfuerzos admisibles (MPa)

	Flexión $F_b$	Tensión II $F_t$	Compresión II $F_c$	Tensión $\perp$ $F_p$	Corte II $F_v$
A	8.3	9.0	4.5	0.4	0.8
B	10.4	11.3	5.6	0.5	1.0
C	12.5	13.6	6.8	0.6	1.2

La tabla 3 muestra los valores de módulo de elasticidad. El valor usado para el análisis de los elementos estructurales debe ser  $E_{0.5}$ ; en el caso de tener condiciones de servicio críticas o que requieran un nivel de seguridad superior, las deflexiones deben ser calculadas usando el  $E_{0.05}$ . En todo caso, la escogencia del módulo de elasticidad adecuado dependerá del criterio del ingeniero calculista y deberá corresponder a alguno de los valores mostrados.

Tabla 3. Módulo de elasticidad (MPa)

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo $E_{min}$
13900	7800	3000

### Esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad modificados

Los valores de esfuerzos admisibles ante las diferentes solicitaciones, presentados en la Tabla 2 y los valores de módulo de elasticidad de la Tabla 3, deberán ser afectados por los coeficientes de modificación presentados en la ecuación (11):

$$F'_i = F_i C_{dF} C_{rF} C_{pF} C_{hF} \tag{11}$$

donde:

$F'_i$  = esfuerzo admisible para una solicitación determinada o módulo de elasticidad modificado.

$F_i$  = esfuerzo admisible para una solicitación determinada o módulo de elasticidad.

$C_{dF}$  = coeficiente de modificación por flujo plástico. Los valores de los esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad deberán reducirse al 90% ( $C_{dF} = 0.90$ ) cuando algún elemento de la estructura esté sometido a esfuerzos máximos admisibles por un periodo mayor a 10 años.

$C_{rF}$  = coeficiente de modificación por redistribución de las cargas. En el caso que exista la acción conjunta garantizada de cuatro o más elementos de igual rigidez, con una separación igual o inferior a 60 cm, los valores de esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad podrán incrementarse un 10% ( $C_{rF} = 1.10$ ).

$C_{pF}$  = coeficiente de modificación por presencia de perforaciones para esfuerzos admisibles. Cuando se practiquen perforaciones horizontales a la altura del eje neutro en vigas, deberán tomarse las provisiones necesarias para evitar la falla por corte paralelo a la fibra y el valor del esfuerzo cortante admisible será reducido en un 50%; en el caso que existan perforaciones en la zona de tensión de las vigas, el valor del esfuerzo admisible a flexión se reducirá en un 30%.

$C_{hF}$  = coeficiente de modificación por contenido de humedad. Cuando se desee hacer una modificación de la resistencia mecánica y del módulo de elasticidad por contenido de humedad podrá usarse ecuación (12):

$$C_{hF} = \frac{P_{si}}{F_i} \left( \frac{P_{si}}{P_{vi}} \right)^{-k_{hF}} \tag{12}$$

en donde:

$P_{si}$  = valor del esfuerzo admisible para una solicitación determinada, para un contenido de humedad en estado seco (generalmente es del 12%).

$P_{vi}$  = valor del esfuerzo admisible para una solicitación determinada en estado verde (húmedo).

$k_{hF}$  = coeficiente que relaciona los diferentes contenidos de humedad con el punto de saturación de la fibra, calculado por medio de la ecuación (13):

$$k_{hF} = \frac{CH - CHS}{PSH - CHS} \tag{13}$$

donde:

$CH$  = contenido de humedad al que se desea conocer el valor de  $C_{hf}$ .

$CHS$  = contenido de humedad en esto seco (generalmente es del 12%).

$PHS$  = contenido de humedad para el punto de saturación de la fibra (aproximadamente 30% de  $CH$ ).

### Diseño de elementos a flexión

Los esfuerzos máximos a tensión y compresión que se presentan por flexión en el elemento serán calculados para la sección de máximo momento y no deberán exceder al máximo esfuerzo admisible por flexión establecido para los culmos de guadua rolliza, modificado por los coeficientes a que haya lugar (flujo plástico, contenido de humedad y redistribución de las cargas); de igual forma, el momento actuante sobre cualquier sección de guadua rolliza constituida por un solo culmo no debe exceder el valor del momento resistente determinado por la ecuación (14).

$$M \leq F_b' \frac{\pi}{32D_e} (D_e^4 - (D_e - 2t)^4) \quad (14)$$

donde:

$M$  = momento flector actuante en la sección de guadua rolliza.

$D_e$  = diámetro externo promedio de la sección de guadua rolliza.

$t$  = espesor promedio de la sección de guadua rolliza.

$F_b'$  = esfuerzo de flexión admisible, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

En el caso de secciones compuestas por dos (2) o más culmos, el momento flector actuante por culmo será igual al momento flector actuante dividido por el número de culmos que conforman el elemento.

El esfuerzo máximo de corte será calculado en la cara del apoyo y deberá ser inferior al máximo esfuerzo

admisible para corte paralelo a las fibras establecido para los culmos de guadua rolliza, modificado por los coeficientes a que haya lugar; la fuerza cortante paralela a las fibras actuante sobre cualquier sección de guadua rolliza formada por un solo culmo no debe exceder el valor de fuerza cortante determinada por la ecuación (15).

$$V \leq \frac{3AF_v'}{4} \left( \frac{1 + \left(1 - \frac{2t}{D_e}\right)^2}{1 + \left(1 - \frac{2t}{D_e}\right) + \left(1 - \frac{2t}{D_e}\right)^2} \right) \quad (15)$$

donde:

$V$  = fuerza cortante paralela a las fibras actuante en la sección de guadua rolliza.

$A$  = área de la sección transversal del elemento de guadua rolliza.

$F_v'$  = esfuerzo admisible para corte paralelo a las fibras, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

En el caso de secciones compuestas por dos (2) o más culmos, la fuerza cortante actuante por culmo será igual a la fuerza cortante dividida por el número de culmos que conforman el elemento.

La carga concentrada aplicada sobre cualquier elemento a flexión debe ser menor que la fuerza admisible de aplastamiento calculada con la ecuación (16):

$$P_p = \frac{2F_p't^2L_a}{3D_e} \quad (16)$$

donde:

$P_p$  = fuerza admisible de aplastamiento.

$F_p'$  = esfuerzo admisible en tensión perpendicular a la fibra, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$L_a$  = longitud de apoyo.

La estabilidad lateral de los culmos a compresión en vigas compuestas por dos o más culmos, se revisará siguiendo el procedimiento de diseño de elementos solicitados a compresión axial (Ver ecuaciones 18, 19 y 20); la fuerza de compresión actuante en la sección corresponde al cociente del momento flector y la distancia entre los centroides de los culmos extremos de la viga compuesta.

Las deflexiones máximas en vigas de guadua rolliza, incluyendo los efectos de cargas permanentes (carga muerta) y de las sobrecargas de servicio (carga viva), no deberán exceder los valores mostrados en la Tabla 4, donde  $L$  corresponde a la distancia de la cara del apoyo al extremo en vigas en voladizo y para cualquier otro tipo de vigas es la luz entre caras de apoyos. Para el cálculo de deflexiones de vigas conformadas por dos o más culmos de guadua rolliza, la inercia de la sección será calculada como  $I = \sum(A_i d_i^2)$ , siendo  $A_i$  el área para el  $i$ -ésimo culmo y  $d_i$  la distancia entre el centroide del conjunto de culmos y el centroide del  $i$ -ésimo culmo.

Tabla 4. Deflexiones máximas admisibles en vigas para estructuras en guadua rolliza

Descripción	Carga total (permanente + sobrecarga)	Sobrecarga de servicio
Edificaciones con cielos rasos de pañete o yeso	$\frac{L}{300}$	$\frac{L}{350}$
Edificaciones con otros tipos de cielos rasos	$\frac{L}{250}$	$\frac{L}{350}$
Techos inclinados y edificaciones industriales	$\frac{L}{200}$	$\frac{L}{350}$
Todo tipo de edificación	-	$\frac{L}{350}$

### Diseño de elementos solicitados por fuerza axial

La capacidad máxima de un elemento de guadua solicitado a tensión axial no debe sobrepasar el valor determinado con la ecuación (17):

$$N = F_t' A_n \tag{17}$$

donde:

$N$  = capacidad máxima del elemento a tensión.

$F_t'$  = esfuerzo de tensión admisible, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$A_n$  = área neta del elemento, que no debe ser menor que el 75% de la sección transversal bruta.

La relación de esbeltez para elementos de guadua rolliza solicitados a compresión está dada por la ecuación (18), donde  $L_e$  es la longitud efectiva calculada con la ecuación (19), y  $r$  el radio de giro dado por la ecuación (20):

$$l = \frac{L_e}{r} \tag{18}$$

$$L_e = L_u k \tag{19}$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{20}$$

En la ecuación (19)  $L_u$  corresponde a la longitud no soportada lateralmente del elemento, y  $k$  es el coeficiente de longitud efectiva cuyo valor depende de las condiciones de apoyo como muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficiente de longitud efectiva

Condición de los apoyos	$K$
Ambos extremos articulados (Ambos extremos del elemento deben estar restringidos al desplazamiento perpendicular a su eje longitudinal)	1.0
Un extremo con restricción a la rotación y al desplazamiento y el otro libre	5.0
Elementos constituidos por un solo culmo	1.0

En la ecuación (20)  $I$  es la inercia de la sección y  $A$  es el área de la sección transversal; cuando la sección esté compuesta por varios culmos la inercia será calculada como la suma de las inercias individuales de cada uno de los culmos ( $I = \sum I_i$ ). Si constructivamente se garantiza un trabajo en conjunto la inercia podrá ser calculada con las siguientes expresiones:

- a) Para elementos en compresión tipo celosía, la inercia será calculada como  $I = \sum(A_i d_i^2)$ , siendo  $A_i$  el área para el  $i$ -ésimo culmo y  $d_i$  la distancia entre el centroide del conjunto de culmos y el centroide del  $i$ -ésimo culmo.
- b) Para elementos en compresión unidos en toda su longitud, la inercia será calculada como  $(I = \sum(A_i d_i^2) + \sum I_i)$ , siendo  $I_i$  la inercia individual de cada culmo referida a su propio centroide.

Los elementos de guadua rolliza solicitados a compresión axial, sin importar si son conformados por uno o varios culmos, se clasifican en cortos y largos, teniendo los primeros un comportamiento inelástico y los segundos elástico. Las ecuaciones que determinan la carga admisible para cada uno de estos casos fueron obtenidas a través de los datos experimentales obtenidos en la investigación de Martín y Mateus (1981).

Siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ISO22156 (2004), existen tres factores de seguridad diferentes para los esfuerzos admisibles que dependen de la duración de la carga (muerta, muerta más viva y las anteriores más carga de viento o sismo). Así, para elementos a compresión considerados cortos ( $\lambda \leq C_k$ ) la carga admisible para la condición de carga muerta es determinada con la ecuación (21), para la condición de carga muerta más viva con la ecuación (22) y para las cargas anteriores más carga de viento o sismo con la ecuación (23).

$$N_{adm} = \frac{F_{kC}}{\frac{0.7}{C_k} \cdot 1 + 4.5} \left[ 1 - \frac{2}{5} \left( \frac{1}{C_k} \right)^3 \right] A_n \quad (21)$$

$$N_{adm} = \frac{F_{kC}}{\frac{0.6}{C_k} \cdot 1 + 3.6} \left[ 1 - \frac{2}{5} \left( \frac{1}{C_k} \right)^3 \right] A_n \quad (22)$$

$$N_{adm} = \frac{F_{kC}}{\frac{0.5}{C_k} \cdot 1 + 3.0} \left[ 1 - \frac{2}{5} \left( \frac{1}{C_k} \right)^3 \right] A_n \quad (23)$$

Para elementos a compresión considerados largos ( $C_k < \lambda < 150$ ), la carga admisible para la condición de carga muerta es determinada con la ecuación (24),

para la condición de carga muerta más viva con la ecuación (25) y para las cargas anteriores más carga de viento o sismo con la ecuación (26).

$$N_{adm} = 1.90 \frac{E}{l^2} A_n \quad (24)$$

$$N_{adm} = 2.35 \frac{E}{l^2} A_n \quad (25)$$

$$N_{adm} = 2.82 \frac{E}{l^2} A_n \quad (26)$$

En las definiciones anteriores  $C_k$  es la relación de esbeltez crítica, calculada por medio de la ecuación (27):

$$C_k = 4.06 \sqrt{\frac{E}{F_{kC}}} \quad (27)$$

Bajo ninguna circunstancia es aceptable trabajar con elementos de columna que tengan una esbeltez mayor de 150.

En las ecuaciones (21) a (27):

$N_{adm}$  = carga admisible dependiendo del tipo de columna.

$F_{kC}$  = esfuerzo característico a compresión.

$A_n$  = área neta del elemento.

$\lambda$  = esbeltez de la columna.

$E$  = módulo de elasticidad de la sección, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

### Diseño de elementos solicitados por flexión y carga axial

Los elementos de la estructura que se encuentren sometidos simultáneamente a fuerzas de tensión y flexión deberán ser diseñados para cumplir la ecuación (28):

$$\frac{N_{at}}{F'_t A} + \frac{M_a}{S_t F'_b} \leq 1.0 \quad (28)$$

donde:

$N_{at}$  = carga axial actuante de tensión.

$M_a$  = valor absoluto del momento flector máximo actuante en el elemento.

$F'_t$  = esfuerzo admisible a tensión, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$F'_b$  = esfuerzo admisible a flexión, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$S_t$  = módulo de la sección referido a la fibra a tensión. Para elementos constituidos por un solo culmo el valor de  $S_t$  será calculado con la ecuación (29), caso contrario se usará la ecuación (30):

$$S_t = \frac{\pi}{32D_e} (D_e^4 - (D_e - 2t)^4) \quad (29)$$

$$S_t = \frac{I}{c_t} \quad (30)$$

En la ecuación (30) la inercia será calculada de la misma forma que para elementos de sección compuesta a compresión y  $c_t$  corresponde a la distancia entre la fibra extrema a tensión y el centroide de la sección compuesta.

Los elementos de la estructura que se encuentren sometidos simultáneamente a fuerzas de compresión y flexión deberán ser diseñados para cumplir la ecuación (31):

$$\frac{N_{ac}}{N_{adm}} + \frac{k_m M_a}{S_c F'_b} \leq 1.0 \quad (31)$$

donde:

$N_{ac}$  = carga axial actuante de compresión.

$M_a$  = valor absoluto del momento flector máximo actuante en el elemento.

$F'_b$  = esfuerzo admisible a flexión, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

$S_c$  = módulo de la sección referido a la fibra a compresión.

$k_m$  = coeficiente de magnificación de momentos, calculado con la ecuación (32):

$$k_m = \frac{1}{1 - 1.5 \left( \frac{N_{ac}}{N_{cr}} \right)} \quad (32)$$

En la ecuación (32)  $N_{cr}$  es la carga crítica, obtenida a partir de la ecuación (33):

$$N_{cr} = \frac{p^2 EI}{L_e^2} \quad (33)$$

En el caso de secciones compuestas por dos (2) o más culmos, la inercia de la sección será calculada usando el mismo procedimiento que para elementos de sección compuesta a compresión; la longitud efectiva  $L_e$  será obtenida a partir de la ecuación (19)

Para elementos constituidos por un solo culmo el valor de  $S_c$  será calculado con la ecuación (34), caso contrario se usará la ecuación (35):

$$S_c = \frac{\pi}{32D_e} (D_e^4 - (D_e - 2t)^4) \quad (34)$$

$$S_c = \frac{I}{c_c} \quad (35)$$

En la ecuación (35) la inercia será calculada de la misma forma que para elementos de sección compuesta a compresión;  $c_c$  corresponde a la distancia entre la fibra extrema a compresión y el centroide de la sección compuesta.

## Conclusiones

En este artículo se presentó la metodología de diseño propuesta como resultado del trabajo realizado en el desarrollo del proyecto de investigación "Validación de la Guadua Angustifolia como material estructural para diseño, por el método de los esfuerzos admisibles", para estructuras que usan guadua como material principal, que incluye los requisitos generales de calidad del material que será usado para la construcción, las combinaciones de carga usadas para el diseño, los valores de los esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad, los requerimientos para el diseño de elementos solicitados a flexión, carga axial y carga axial y flexión simultáneamente.

El trabajo interdisciplinario con la participación de diferentes actores de la cadena de la guadua y la academia, ha permitido obtener una propuesta para el diseño de estructuras de guadua por esfuerzos admisibles. Se espera hacer una amplia difusión de los resultados obtenidos para motivar la oferta y demanda de guadua de alta calidad que cuente con los parámetros necesarios de resistencia para la construcción.

El documento “Guías de diseño para estructuras en Guadua *Angustifolia Kunth*” donde se encuentra la metodología de diseño resultado del trabajo realizado en el desarrollo del proyecto de investigación

Validación de la Guadua *Angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de los esfuerzos admisibles” se utilizó como material base del Capítulo G.12 del nuevo Reglamento de Diseño Sismo Resistente NSR-10.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural así como a la Sociedad Colombiana del Bambú y Arme Ideas en Guadua por su asesoría a lo largo de la ejecución de este trabajo.

## Referencias

- Acuña, F. y Pantoja, N. (2005) Resistencia al corte paralelo a la fibra de la guadua *angustifolia*. Bogotá. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998). Normas Colombianas de Diseño Sismo Resistente. (NSR-98). Bogotá.
- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). NSR-09 Edición preliminar para discusión pública.
- Carvajal, W.; Ortégón, W.; Romero C. (1981) Elementos estructurales en bambú. Bogotá. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- González, C. (2006) Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad. Bogotá. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hidalgo, O. (2003). Bamboo the gift of the gods. 1 ed. Colombia: Editorial D'VINNI Ltda.
- Hidalgo, O. (1978) Nuevas técnicas de construcción con bambú y concreto reforzado con cables de bambú. CIBAM. Universidad Nacional de Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2008). Cosecha y postcosecha del culmo de *Guadua angustifolia Kunth*. (NTC5300). Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2007). Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia Kunth*. (NTC5301). Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2006). Uniones de estructuras con *Guadua angustifolia Kunth*. (NTC5407). Bogotá.
- International Network on Bamboo And Rattan, INBAR (1999). Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo.
- International Organization for Standardization, ISO (2004). Bamboo structural design. (ISO 22156).
- Jiménez, Carlos (1999). Al eje cafetero lo mató el abuso de casas en concreto. Diario El Tiempo. Bogotá, 11 de febrero. En [www.eltiempo.com](http://www.eltiempo.com)
- Martín, J. y Mateus, L. (1981). Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua Castilla. Bogotá. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Merino, F.; Rodríguez, G.; Vallejo, J. (1972) Elementos de concreto reforzado con guadua. Bogotá. Trabajo de grado. Escuela de ingeniería de Antioquia, Medellín.
- Prada, J.; Zambrano, J. (2003). Estudio de elementos en guadua, solicitados a compresión, con perforación para el relleno de mortero. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Trujillo, M. y Peláez, J. (1983). Construcción con guadua. Medellín. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Uribe, M. y Durán, A. (2002). Estudio de elementos solicitados a compresión armados con dos o más guadas. Bogotá Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

## Sobre los autores:

---

### **Patricia Luna**

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,  
Colombia. plunat@unal.edu.co

### **Caori Takeuchi**

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,  
Colombia. cptakeuchi@unal.edu.co

### **Gustavo Granados**

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,  
Colombia. ggranadosv@yahoo.es

### **Fabian Lamus**

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,  
Colombia. falamusb@unal.edu.co

### **Jorge Lozano**

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,  
Colombia. jelozanop@unal.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la  
Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.