

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 sísmo 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, contruidos 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 ϕ_a y en planta ϕ_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 ϕ_a y ϕ_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):

$$F'_i = F_i C_{dF} C_{rF} C_{pF} C_{hF} \quad (11)$$

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):

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

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):

$$k_{hF} = \frac{CH - CHS}{PSH - CHS} \quad (13)$$

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).

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

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):

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

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.