



**Figura 22. Pruebas de cizalladura en GAK**

Fuente: González & Díaz (1992)

$$F_{pl} = M_{pl} / z(N / mm^3) \quad (12)$$

$$F_{bm} = M_{ult} / z(N / mm^2) \quad (13)$$

$$E = F_{pl}L^3 / 48\Delta_{pl}(N / mm^3) \quad (14)$$

Donde:

Mpl: momento flector en el límite proporcional (N.mm).

Mult: momento flector en la carga máxima (N.mm).

Fpl: carga en el límite proporcional (N).

L: luz de la probeta (mm).

$\Delta_{pl}$ : deflexión (mm).

I: momento de inercia (mm<sup>4</sup>).

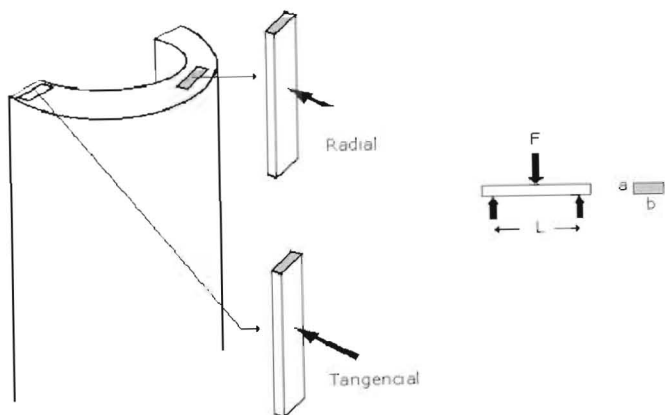
Z: módulo de la sección (mm<sup>3</sup>).

Dado que el bambú es un material anisotrópico y sus esfuerzos varían de acuerdo con el tipo de aplicación de la carga, ya sea en sentido longitudinal, radial o tangencial, se recomienda realizar los ensayos a flexión en sentido radial y tangencial, con el fin de tener una buena aproximación a su comportamiento (ver figura 23).

Osorio (2006), encontró valores de resistencia a flexión de elementos sometidos a esfuerzos radiales y tangenciales con ausencia y presencia de nudos. Estableció que la resistencia del material sometido a esfuerzos tangenciales es mayor que la sometida a esfuerzos radiales, y que los que presentan nudos son ligeramente mayores que aquellos que no los presentan. Es importante tener en cuenta este comportamiento principalmente en la industria de laminados, donde el material trabaja independientemente de la manera como se reciben o aplican las cargas (ver figura 24).

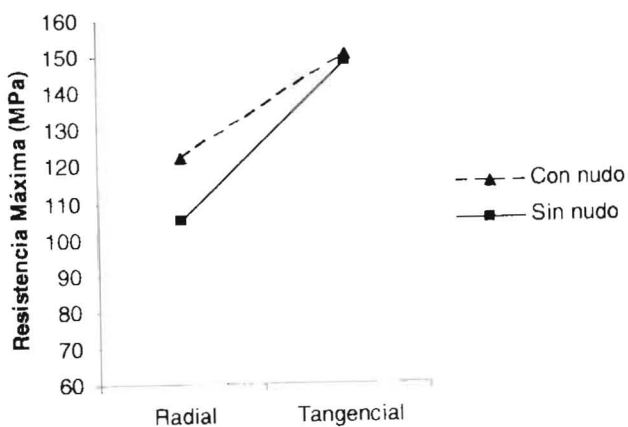


**Figura 23. Probeta para realizar ensayos a flexión con cargas radiales y tangenciales sobre el material**



Fuente: Ahmad (2000)

**Figura 24. Resistencia a flexión de la GAK a esfuerzos radiales y tangenciales**



Fuente: Osorio (2006).

## Resistencia a compresión

Para el dimensionamiento de probetas a compresión se sugiere seguir la metodología propuesta por la norma ASTM D 143-94 en su numeral 9,1. Sin embargo, Guarín (2005), debido a las características anatómicas del bambú, apoyado en dicha norma y con base en la teoría sobre columnas y los ensayos preliminares, propuso que para fallar probetas a compresión a nivel del material, se deben tener en cuenta relaciones de esbeltez que varíen entre 4 y 8.

## Resistencia a tracción

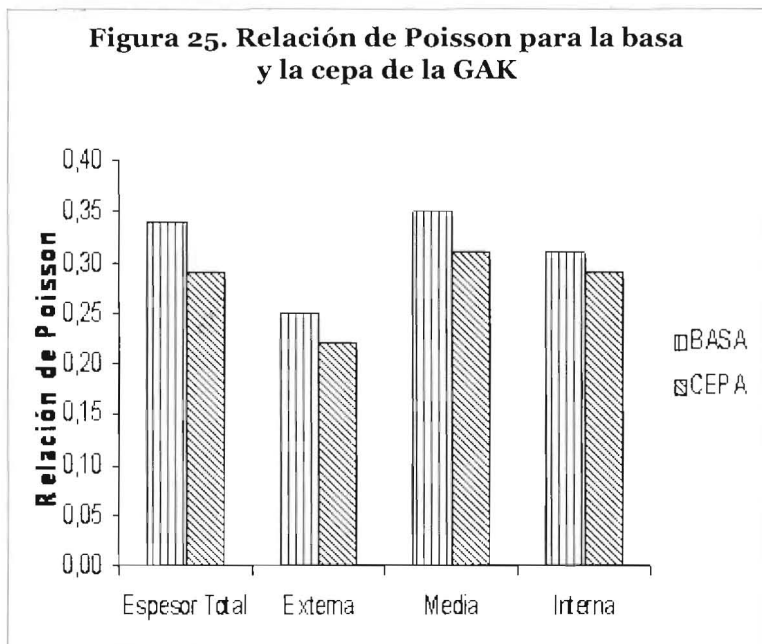
Para determinar la resistencia a tensión a nivel del material, se emplea el mismo procedimiento utilizado para elementos, de acuerdo con la norma norma ISO 22157 (2004), utilizada para elementos.

## Relación de Poisson

La Relación de Poisson es otro parámetro importante para tener en cuenta en el diseño de estructuras de GAK. Actualmente, para la Relación de Poisson para la GAK, se utilizan los valores comunes de la madera, aspecto que es considerado erróneo, dadas las diferencias de comportamiento.

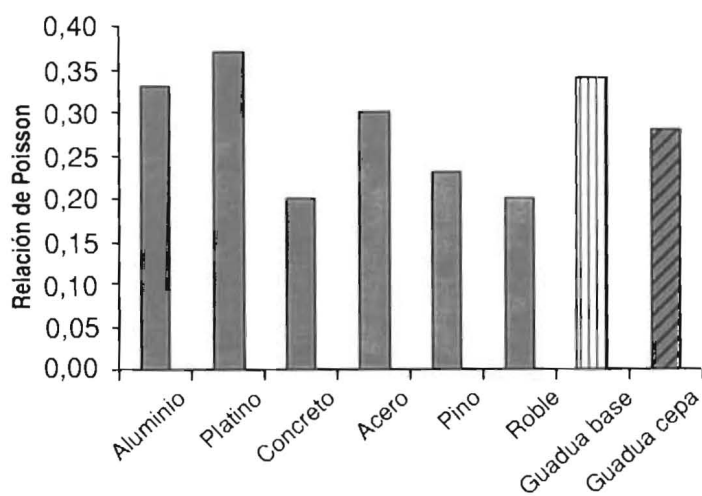
Teniendo en cuenta que el espesor de la GAK presenta tres zonas anatómicamente diferenciadas (externa, media e interna), Osorio *et al* (2007), obtuvieron valores de Relación de Poisson para cada una de estas tres capas diferenciadas, tanto en la cepa como en la basa del elemento, cuyos resultados se muestran en la figura 25.

Se ha encontrado que la Relación de Poisson es significativamente superior ( $P < 0,05$ ), en la basa con respecto a la cepa, tanto en el espesor total como en cada una de las capas analizadas. Lo anterior debido a que en la basa existe un mayor porcentaje de fibras y menor de parénquima, lo que le permite una menor deformación lateral al material en relación con la cepa.



La figura 26 muestra una comparación de la Relación de Poisson con otros materiales. Se observa que los valores en GAK presentan diferencias frente a otras maderas como el pino y el roble, aspecto que se debe al grado de flexibilidad que imprime la matriz fibra-parénquima, ya que la distribución de las fibras se da en sentido radial y tangencial, mientras que en la GAK la disposición de las fibras es en sentido longitudinal, es decir, paralela al culmo o tallo, lo que permite una mayor deformación lateral, similar a la de otros materiales metálicos como el aluminio, el platino, e incluso el acero.

Osorio *et al* (2007), concluyeron que la Relación de Poisson en GAK es una propiedad mecánica que depende significativamente de la estructura del material, cuyos valores varían entre 0,22 y 0,35. Estos resultados muestran la alta anisotropía del producto; sin embargo, se pueden utilizar para el espesor total en la cepa valores cercanos a 0,28 y 0,32 para la basa, aunque para una mayor aproximación es necesario adelantar mayores investigaciones sometiendo el material a cargas en varias direcciones para determinar el grado de anisotropía.

**Figura 26. Comparación de la relación de Poisson en diferentes materiales**

# Capítulo 3

Diseño de  
elementos en

**Guadua**



**Cubierta estructura Parque Panaca  
en Quimbaya (Quindío)**

Foto. Eugenia González C. 2004

## Método de diseño

El diseño de elementos de guadua, al igual que los de madera, se ha venido realizando por el Método de Tensiones Admisibles establecido por la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC), en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, y retomados por la norma NSR 98, considerando que el material se comporta elásticamente; sin embargo, vale la pena analizar en posteriores investigaciones, modelamientos bajo regimenes inelásticos.

Actualmente existe la norma ISO 22156 (2004) “Bamboo Structural Design”, que no presenta incompatibilidades a nivel de criterios de diseño con lo que propone la NSR 98 en el capítulo para el diseño de estructuras de madera (Título G), por lo que la NSR 98 puede seguir siendo válida hasta que se tenga una normativa exclusivamente para el diseño de estructuras aporticadas en guadua.

Para realizar diseños con este método es necesario conocer las tensiones admisibles de los elementos, así como sus módulos de elasticidad (E) respectivos; por tal razón, se hará énfasis en este tema antes de definir la metodología de diseño de elementos.

## Tensiones admisibles

La resistencia de la guadua, al igual que la de madera, presenta una variabilidad natural que depende de factores climáticos, edafológicos, así como de características mismas del crecimiento del culmo.

La tensión última se define como aquella correspondiente al límite de exclusión del 5 %; es decir, se espera que de toda la población existente de dicha especie solamente el 5% tenga una resistencia menor que este valor.

Las tensiones admisibles están basadas en resultados con probetas libres de defectos, y se determinan utilizando factores de reducción por calidad, tamaño, seguridad y duración de carga, tal como se expresa en la ecuación 15.

$$F_i \approx \frac{FC \ FT}{FS \ FDC} * F_{básico\ i} \quad (15)$$

Donde:

$F_i$ : tensión admisible.

$F_{básico\ i}$ : tensión admisible básica i.

FC: factor de reducción por calidad.

FT: factor de reducción por tamaño.

FS: factor de servicio y de seguridad.

FDC: factor de duración de carga.

En la tabla 11, se presentan los factores de reducción recomendados por López &Trujillo (2002).

**Tabla 11. Factores de reducción considerados para la GAK**

	Flexión	Compresión paralela	Corte paralelo	Tracción (López &Trujillo 2002)
FC	0,80	--	--	--
FT	0,90	--	--	--
FS	2,00	1,60	4,00*	1,20
FDC	1,25	1,25	--	1,11

\*Incluye factor por concentración de esfuerzos =2,0

Fuente: López &Trujillo (2002).

De acuerdo a la JUNAC (1984), en el caso de tensiones admisibles para viguetas se usa un incremento del 10%, sobre el valor nominal, debido a la acción de grupo. Es importante tener en cuenta que estos factores de reducción se deben aplicar en GAK maduras; es decir, con edades que varían entre los tres y cinco años, y con contenidos de humedad menor del 20% en base seca.

Una vez aplicados los factores de reducción se obtienen las tensiones admisibles ( $F_i$ ) para la guadua, las cuales se reportan por López & Trujillo (2002), comparándolos con los de madera en sus diferentes grupos de clasificación, tal como se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12. Tensiones admisibles para madera y guadua (MPa)**

Grupo	flexión $F_b$	tensión $F_t$	com- presión paralela $F_c$	com- presión perpen- dicular $F_p$	cortante $F_v$
A	21	14,5	14,5	4	1,5
B	15	10,5	11	2,8	1,2
C	10	7,5	8	1,5	0,8
Guadua	15	26,4	14	Mortero	1,1

Fuente: López & Trujillo (2002).

Para determinar los valores de esfuerzos admisibles para la guadua, actualmente la norma ISO 22156 “Bamboo Structural Design” da a conocer lo siguiente:

Las propiedades del material están representadas por el quinto (5) percentil, o como aquel correspondiente al límite de exclusión del 5%; es decir, en aquel que se espera que de toda la población existente de dicha especie solamente el 5% tenga una resistencia menor que este valor. El valor característico se puede obtener por la siguiente ecuación:



$$R_k = R_{0,05} \left( 1 - \frac{2,7 \frac{X}{m}}{\sqrt{n}} \right) \quad (16)$$

Donde:

$R_k$ : el valor característico (Esfuerzo admisible).

$R_{0,05}$ : el percentil 5, de los datos de la prueba.

$m$ : el valor medio de los datos de la prueba.

$X$ : la desviación estándar de los datos de la prueba.

$n$ : el número de veces que se realizó la prueba (se recomienda no menor de 10).

Para determinar el valor de esfuerzo admisible ( $F_i$ ), la norma ISO 22156 "Bamboo Structural Design" recomienda utilizar la siguiente ecuación:

$$F_i \approx \frac{R_k G D}{H} \quad (17)$$

Donde:

$F_i$ : esfuerzo admisible en N/mm<sup>2</sup>.

$G$ : es el valor que corresponde a la diferencia entre los datos obtenidos en el laboratorio y la práctica; toma un valor de 0,5.

$D$ : es la modificación del valor por duración de carga:

1,0 para carga permanente

1,25 para carga permanente más carga temporal.

1,5 para la carga permanente, la temporal más la de viento.

$H$ : es el factor de seguridad, y toma un valor de 2,25

Nota: la norma ISO 22156 propone que con una desviación estándar del 15%, y para cargas permanentes, el esfuerzo admisible es 1/7 de la media del esfuerzo último.

De acuerdo con lo anterior, para determinar los valores de esfuerzos admisibles ( $F_i$ ) para la guadua, se recomienda encontrar este valor aplicando las ecuaciones 16 y 17, lo

que significa que es pertinente actualizar los valores de esfuerzos admisibles reportados por varios autores, como los recomendados por López & Trujillo (2002), que ya fueron mostrados en la tabla 12.

### Módulos de elasticidad (E)

Otro parámetro importante en el diseño de elementos es el Módulo de Elasticidad (E). Para el análisis y diseño de elementos se recomienda considerar el valor del Módulo de Elasticidad Mínimo ( $E_{mín}$ ) como módulo de elasticidad del material, con el fin de garantizar mayor seguridad a la estructura. Utilizar el Módulo de Elasticidad promedio ( $E_{prom}$ ) equivale a aceptar una probabilidad hasta del 50% de que el módulo de elasticidad esté por debajo de lo considerado; por ello, el  $E_{prom}$  sólo se considera adecuado para la estimación de deflexiones cuando se presenta una acción de conjunto de varios elementos. Este aspecto es importante, ya que en la mayoría de las investigaciones sólo se reporta el Módulo de Elasticidad Promedio.

Los Módulos de Elasticidad (E), al igual que las tensiones últimas obtenidas, varían de acuerdo con la procedencia del material vegetal. En la tabla 13 se presentan algunos valores de E obtenidos de diversas investigaciones realizadas.

En la figura 27, Osorio (2006), se indican los valores de los módulos de elasticidad del material, analizando cada una de sus capas, y sometidos a resistencias radiales y tangenciales bajo cargas a flexión, a un contenido de humedad del 10% tanto en la cepa como en la basa, considerando la presencia y ausencia de nudo. Se encontró que el Módulo de Elasticidad bajo esfuerzos radiales es menor que bajo esfuerzos tangenciales. Además, que el E en el material con nudo es menor que en el que no presenta nudo, comportamiento que se debe a lo frágil del material cuando presenta nudo.