

**ESTUDIO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A COMPRESIÓN
ARMADOS POR TRES GUADUAS**

**MARITZA URIBE VALLEJO
ALEJANDRO DURÁN CONTRERAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2002

**ESTUDIO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A COMPRESIÓN
ARMADOS POR TRES GUADUAS**

**MARITZA URIBE VALLEJO
ALEJANDRO DURÁN CONTRERAS**

**Tesis para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
CAORI PATRICIA TAKEUCHI TAN
Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2002

NOTA DE ACEPTACIÓN

ING. CAORI P. TAKEUCHI
Directora del Proyecto de Grado

ING. GABRIEL GOMEZ CORTES
Jurado

ING. LUZ AMANDA SALAZAR
Jurado

BOGOTÁ D.C., 4 de Octubre de 2002

Los sueños cumplidos son estrellas en el firmamento...
y las estrellas son luz para el mundo.
A mis padres, Humberto y Eugenia,
por enseñarme el firmamento
A mi hermano Andrés, por descubrirlo juntos
A John, mi amor, por soñar conmigo
A Alejo, por esta estrella.

Maritza

A mis padres y mi hermana
Por su incondicional apoyo y confianza
A mis abuelitas que son mi motivación
A Mari por enseñarme el camino
A Cris por su sonrisa inolvidable

Alejandro

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por apoyarnos durante el desarrollo de la investigación, el curso de nuestra carrera y toda nuestra vida.

A Caori Takeuchi Tan, Ingeniera Civil, directora del proyecto de grado y profesora de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por su confianza al vincularnos al proyecto, por sus valiosas orientaciones y enseñanzas durante el desarrollo del mismo y a lo largo de nuestra formación.

A Ricardo Martínez, Ingeniero Civil y profesor de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por sus valiosos aportes, interés y colaboración a lo largo del proyecto.

Al programa Apoyo a Semilleros de Investigación de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por su apoyo para la realización del proyecto.

A Eduardo Gamboa, laboratorista del Laboratorio de Metalurgia del Instituto de Ensayos e Investigaciones I.E.I. de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por su valiosa colaboración y experiencia.

A todo el personal del Laboratorio de Materiales del Instituto de Ensayos e Investigaciones I.E.I. de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por su colaboración y apoyo.

A todo el personal administrativo de dirección de carrera y de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

A Edwin Flórez y Jorge Garzón, por su inmensa colaboración, apoyo y amistad.

TABLA DE CONTENIDO

1. JUSTIFICACIÓN	17
2. OBJETIVO	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. INTRODUCCIÓN	20
4. RESEÑA HISTÓRICA	23
5. MARCO TEÓRICO	27
5.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	28
5.2. CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESARROLLO Y CULTIVO DE LA GUADUA (GUADUA ANGUSTIFOLIA)	30
5.2.1. TEMPERATURA	30
5.2.2. LATITUD	31
5.2.3. PRECIPITACIÓN	31
5.2.4. HUMEDAD RELATIVA	31
5.2.5. BRILLO SOLAR	31
5.2.6. VIENTOS	31
5.2.7. NUBOSIDAD	31
5.2.8. SUELOS	32
5.3. MORFOLOGÍA GENERAL DE LA GUADUA	32
5.3.1. RIZOMA	32
5.3.2. TALLO Ó CULMO	34
5.4. INFLORESCENCIA	37
5.5. FASES DE DESARROLLO DE LA GUADUA	37
5.6. PARTES DE UNA GUADUA Y SU UTILIZACIÓN	38
5.7. CORTE	40

5.8. CURADO Y SECADO	42
5.9. TRATAMIENTOS QUÍMICOS (PRESERVACIÓN DE LA GUADUA)	44
6. ANTECEDENTES	47
7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	54
7.1. PROPIEDADES FÍSICAS	54
7.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)	54
7.1.2. DENSIDAD BÁSICA (DB)	55
7.2. PROPIEDADES MECÁNICAS	55
7.2.1. ELASTICIDAD	55
7.2.2. TEORÍA DE PANDEO DE COLUMNAS	58
8. METODOLOGÍA DE TRABAJO	63
8.1. MATERIAL UTILIZADO	63
8.2. CLASIFICACION DE LAS PROBETAS	64
8.3. MÁQUINAS Y EQUIPOS UTILIZADOS	65
8.4. DETERMINACIÓN DE MODELOS DE ENSAYOS	66
8.4.1. ENSAYO DE HUMEDAD	66
8.4.2. ENSAYO DE DENSIDAD BÁSICA	67
8.4.3. ENSAYO DE PROBETAS CORTAS	67
8.4.4. ENSAYO DE COLUMNAS INDIVIDULES	68
8.4.5. ENSAYO DE COLUMNAS ARMADAS CON TRES GUADUAS	68
9. DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DE UNIONES	69
9.1. TIPOS DE UNIONES PROPUESTAS	70
9.2. DESCRIPCION Y MATERIALES EMPLEADOS EN CADA UNIÓN	71
9.2.1. UNIÓN TIPO UNO	71
9.2.2. UNIÓN TIPO DOS	77
9.2.3. UNIÓN TIPO TRES	83
10. CÁLCULOS Y RESULTADOS	88

10.1. CÁLCULOS PRELIMINARES	88
10.1.1. ÁREA (A)	88
10.1.2. RADIO DE GIRO (R)	88
10.1.3. RELACIÓN DE ESBELTEZ (λ)	89
10.2. TIPOS DE FALLAS	89
10.2.1. FALLA POR APLASTAMIENTO (AP)	90
10.2.2. FALLA POR PANDEO (P)	90
10.2.3. FALLA INTERMEDIA ENTRE PANDEO Y APLASTAMIENTO (IN)	90
10.3. LIMITE DE EXCLUSIÓN	91
10.4. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	91
10.5. ENSAYO DE COLUMNAS INDIVIDUALES	92
10.6. DISEÑO DE UNIONES	94
10.7. ENSAYO DE COLUMNAS ARMADAS CON TRES GUADUAS	95
<u>11. ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	<u>97</u>
11.1. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN	97
11.2. CURVA DE ESFUERZO – RELACIÓN DE ESBELTEZ	99
11.3. ENSAYO DE COLUMNAS ARMADAS CON TRES GUADUAS	103
11.4. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y DEL ESFUERZO MÁXIMO (σ_{MAX}) CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.	109
11.4.1. PROBETAS CORTAS	109
11.4.2. PROBETAS INTERMEDIAS Y LARGAS	112
11.5. RELACIÓN PESO-COSTO DE LAS UNIONES	114
11.6. VALOR DE DISEÑO POR ESFUERZOS ADMISIBLES A COMPRESIÓN	115
<u>12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>117</u>
<u>13. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>122</u>

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1. Clasificación taxonómica de la guadua	29
Tabla No. 2. Descripción y utilización de la guadua	39
Tabla No. 3. Resumen de resultados del trabajo de grado "Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla" por Martín y Mateus.	51
Tabla No. 4. Resumen de resultados del trabajo de grado "Esfuerzos de trabajo para elementos estructurales en guadua" por Gómez y Rubio.	52
Tabla No. 5. Propiedades de diferentes tipos de cuerdas	72
Tabla No. 6. Cargas admisibles a tensión (Kgf) para diferentes tipos de cuerda	73
Tabla No. 7. Resistencia a tensión de cuerda de polipropileno de 3/16"	73
Tabla No. 8. Resistencia a tensión de cuerda de polipropileno de 3/16" sumergida en agua	74
Tabla No. 9. Propiedades de los cables de acero galvanizado	78
Tabla No. 10. Resistencia a tensión de alambre de acero galvanizado de 1/8"	79
Tabla No. 11. Especificaciones técnicas para el uso de prensacables	80
Tabla No. 12. Ensayos de compresión para determinar el módulo de elasticidad	92
Tabla No. 13. Ensayo de columnas individuales que fallaron por aplastamiento	92
Tabla No. 14. Ensayo de columnas individuales que fallaron simultáneamente por Pandeo y aplastamiento	93
Tabla No. 15. Ensayo de columnas individuales que fallaron por pandeo	93
Tabla No. 16. Número de vueltas requeridas para cada unión	95
Tabla No. 17. Ensayo de columnas de 3,00 metros armadas con tres guaduas	96
Tabla No. 18. Relación de esbeltez crítica para diferentes módulos de elasticidad	101
Tabla No. 19. Comparación de esfuerzos teóricos y reales entre columnas individuales y compuestas	105
Tabla No. 20. Comparación de cargas máximas teóricas y reales entre columnas individuales y compuestas	107
Tabla No. 21. Relaciones de esbeltez de columnas compuestas e individuales	108
Tabla No. 22. Relación entre propiedades físicas y mecánicas	112
Tabla No. 23. Relación costo/peso de las uniones	115
Tabla No. 24. Esfuerzos máximos promedio y admisible para la guadua	117

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica No. 1. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para columnas individuales	93
Gráfica No. 2. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para columnas armadas con tres guaduas	96
Gráfica No. 3. Curvas esfuerzo deformación obtenidas de las probetas cortas	98
Gráfica No. 4. Histograma de esfuerzos máximos a compresión	99
Gráfica No. 5. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para diferentes módulos de elasticidad	101
Gráfica No. 6. Curva esfuerzo contra relación de esbeltez del proyecto "Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla" comparado con los resultados obtenidos en el presente estudio.	103
Gráfica No. 7. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con todas las probetas ensayadas	103
Gráfica No. 8. Relación porcentual entre el radio de giro y las cargas máximas	107
Gráfica No. 9. Relación entre el módulo de elasticidad y el contenido de humedad en probetas cortas	110
Gráfica No. 10. Relación entre el módulo de elasticidad y la densidad básica en probetas cortas	110
Gráfica No. 11. Relación entre el esfuerzo máximo y el contenido de humedad en probetas cortas	111
Gráfica No. 12. Relación entre el esfuerzo máximo y la densidad básica en probetas cortas	111
Gráfica No. 13. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de contenido de humedad	113
Gráfica No. 14. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de densidad básica	113
Gráfica No. 15. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de espesores	114

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1. Ideograma "CHU"	24
Figura No. 2. Puente en guadua durante el período de la colonización antioqueña	26
Figura No. 3. Rizoma paquimorfo	33
Figura No. 4. Nudo del tallo con la yema de las ramas	36
Figura No. 5. Brote de una rama espinosa en un nudo interior del tallo	36
Figura No. 6. Sección longitudinal del tallo	40
Figura No. 7. Curado en la mata	43
Figura No. 8. Curado por inmersión en el agua	43
Figura No. 9. Método de transpiración de las hojas	45
Figura No. 10. Elemento prismático sujeto a tensión	56
Figura No. 11. Diagrama esfuerzo deformación	57
Figura No. 12. Diagrama esfuerzo de compresión contra relación de esbeltez	60
Figura No. 13. Esquema del nudo utilizado en la unión tipo uno	75
Figura No. 14. Esquema de la sección transversal de la unión tipo uno	76
Figura No. 15. Esquema de la unión tipo uno	76
Figura No. 16. Prensacable	79
Figura No. 17. Detalle de la forma correcta de colocar los presacables	80
Figura No. 18. Esquema de la unión tipo dos	82
Figura No. 19. Esquema de la sección transversal de la unión tipo dos	82
Figura No. 20. Mezcla realizada para preparar la masilla adhesiva	84
Figura No. 21. Esquema de la sección transversal de la unión tipo tres	86
Figura No. 22. Esquema de la unión tipo tres	87

LISTA DE FOTOS

Foto No. 1. Guadual en la ronda de un río	20
Foto No. 2. Guadua angustifolia	27
Foto No. 3. Guadual	32
Foto No. 4. Reproducción asexual en rizomas paquimorfos	33
Foto No. 5. Rizomas paquimorfos de guadua	33
Foto No. 6. Culmo de una guadua angustifolia kunth	34
Foto No. 7. Culmo de una guadua angustifolia kunth	35
Foto No. 8. Sección transversal del tallo de una guadua	35
Foto No. 9. Inflorescencia en guadua angustifolia	37
Foto No. 10. Rebrote	37
Foto No. 11. Guadua joven "viche"	37
Foto No. 12. Guadua madura "hecha"	38
Foto No. 13. Guadua seca	38
Foto No. 14. Guadual apto para realizar el corte	40
Foto No. 15. Forma adecuada de realizar el corte	40
Foto No. 16. Buen corte de la guadua	41
Foto No. 17. Corte en pocillo	41
Foto No. 18. Método de inmersión	45
Foto No. 19. Método de Boucherie modificado	45
Foto No. 20. Casa del Proyecto Nacional del Bambú, Costa Rica	49
Foto No. 21. Pabellón Zeri replica hecha en Manizales	50
Foto No. 22. Guadua Macana	63
Foto No. 23. Ensayo de compresión paralela a la fibra	67
Foto No. 24. Detalle de apoyo con rótula para ensayo de probetas tipo A	68
Foto No. 25. Guaduas aptas para la realización de probetas	69
Foto No. 26. Unión tipo uno en los extremos de una probeta	71
Foto No. 27. Sección transversal de la unión tipo uno	71
Foto No. 28. Rollo de cuerda de polipropileno	71
Foto No. 29. Cuerda de polipropileno de 3/16" marca ZUBI-OLA	72
Foto No. 30. Ensayo a tensión de cuerda de polipropileno de 3/16"	74

Foto No. 31. Unión tipo uno en el centro de la longitud de la probeta	76
Foto No. 32. Detalle de la sección transversal unión tipo dos	77
Foto No. 33. Rollos de alambre de acero galvanizado	78
Foto No. 34. Torcómetro	80
Foto No. 35. Detalle de la lámina de acero calibre 18 en la unión tipo dos	80
Foto No. 36. Sección de la unión tipo tres con el amarre de cuerda realizado	83
Foto No. 37. Bambúes en la sección de la unión tipo tres	83
Foto No. 38. Detalle de la masilla en la unión tipo tres	84
Foto No. 39. Detalle de la sección transversal de la unión tipo tres	86
Foto No. 40. Unión tipo tres en el centro de la longitud de la columna	86
Foto No. 41. Falla por aplastamiento	90
Foto No. 42. Falla por pandeo	90
Foto No. 43. Sección transversal del tallo de una guadua	112

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. LA GUADUA

ANEXO B. ANEXO FOTOGRÁFICO

ANEXO C. LABORATORY MANUAL ON TESTING METHODS FOR DETERMINATION OF
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO

ANEXO D. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA GUADUA

ANEXO E. GRÁFICAS PARA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

ANEXO F. RECOMENDACIONES DEL MATERIAL EMPLEADO EN LAS UNIONES

NOMENCLATURA

- A : Área de la sección transversal
CH : Contenido de humedad
CV : Coeficiente de variación
DB : Densidad básica
 d_e : Diámetro externo
 d_i : Diámetro interno
e : Espesor de la pared
e : Deformación unitaria
E : Módulo de elasticidad
 F_l : Fuerza lateral que se genera por el pandeo de un elemento largo de guadua
I : Inercia de la sección transversal
L: Longitud de la probeta
 λ : Relación de esbeltez
 λ_c : Relación de esbeltez crítica
 λ_{ind} : Relación de esbeltez de guaduas individuales
 λ_{comp} : Relación de esbeltez de columnas armadas con tres guaduas
P : Carga axial a compresión
 P_{adm} : Carga admisible del material con el que se realizó la unión
 P_{cr} : Carga crítica de Euler
 $P_{m\acute{a}x}$: Carga máxima axial a compresión
 P_h : Peso de la muestra antes de secar
 P_s : Peso de la muestra después de secar
 P_{sh} : Peso de seco al horno
 σ_{adm} : Esfuerzo admisible a compresión
 σ_{lp} : Esfuerzo en el límite de proporcionalidad
 σ_u : Esfuerzo máximo a compresión
 σ_x : Desviación estándar
 $\% \Delta \sigma_{exper}$: Porcentaje que aumenta el esfuerzo máximo experimental con respecto a la condición en la que no se realiza ningún tipo de unión
 ϕ : Coeficiente de reducción de esfuerzos

$\% \Delta \sigma_{\text{teor}}$: Porcentaje que aumenta el esfuerzo máximo teórico con respecto a la condición en la que no se realiza ningún tipo de unión

$\% \Delta P_{\text{exper}}$: Porcentaje que aumenta la carga máxima experimental con respecto a la condición en la que no se realiza ningún tipo de unión

$\% \Delta P_{\text{teor}}$: Porcentaje que aumenta la carga máxima teórica con respecto a la condición en la que no se realiza ningún tipo de unión

$\% \Delta r$: Aumento porcentual del radio de giro con respecto a las columnas individuales

1. JUSTIFICACIÓN

Una de las necesidades básicas del hombre a través de su evolución a lo largo de la historia ha sido la vivienda. En principio se refugió en cuevas y albergues que le brindaba la naturaleza, posteriormente, empleó troncos, ramas y piedras para edificar sus primeras viviendas, conforme evolucionó su raciocinio y se fueron haciendo más grandes sus necesidades, buscó nuevos materiales y alternativas de construcción, utilizando la madera, el hierro, el acero, el ladrillo y hasta hace poco el concreto y en miras a un futuro cercano y retomando costumbres del pasado, la guadua, haciendo posibles y materializables sus proyectos e ideas fabulosas de la construcción habitacional.

La materialización de estos proyectos, depende en gran parte de la disponibilidad del material con el cual se desea construir, y a su vez esta disponibilidad es función de los recursos económicos con los que se cuente para adquirir dicho material, al igual que de la mano de obra necesaria para llevarlo a cabo. La guadua, en este sentido responde eficientemente y ofrece grandes facilidades, ya que es un material de excelentes propiedades físico-mecánicas, que garantizarían la estabilidad y seguridad de una estructura a costo asequible a las necesidades y posibilidades de una comunidad que carezca de recursos económicos.

El principio fundamental de una estructura sencilla, que pretenda dar solución a una vivienda, es la noción de pórtico, el cual a su vez está constituido, en su forma más simplificada, por una viga y dos columnas, es decir que para concebir un proyecto estructural tanto a pequeña como a gran escala es imprescindible hablar de columnas y de vigas. En proyectos de grado anteriores, se ha estudiado el comportamiento de la guadua a flexión, es decir su respuesta ante solicitaciones de carga que la harían trabajar como viga, en el presente documento, se desarrollará un procedimiento, que permitirá estudiar el comportamiento de la guadua como material estructural, específicamente ante solicitaciones que la hagan trabajar como columna (esfuerzos de compresión).

La anatomía y morfología de la guadua, hacen pensar casi de inmediato que por la disposición de sus nudos y entrenudos, su trabajo a compresión es excelente. Nuestros campesinos y algunos constructores, han advertido esta propiedad de la guadua, empleándola como para columna, en la solución a sus viviendas y procesos constructivos.

A pesar de la bondad que posee la guadua de tener características físicas que le permitan un comportamiento bueno a compresión, presenta el problema de todos los elementos esbeltos, el pandeo lateral, que ante sollicitaciones de cargas verticales producen un efecto de deflexión sobre el elemento de guadua, restándole resistencia además de credibilidad en sus propiedades. Este fenómeno de pandeo lateral se encuentra interrelacionado con la sección transversal del elemento que lo sufre, por esta razón el alcance de este trabajo es proponer una solución que garantice una forma eficiente de unir tres guaduas para producir una sección de columna más favorable estructuralmente al trabajar como una sección compuesta, que mejore la capacidad portante, con uniones de fácil fabricación y con materiales de fácil accesibilidad, económicos y manejables, que permitan construirle a los colombianos de bajos recursos casas resistentes y estéticamente agradables, y demostrar a quienes aún son incrédulos en las propiedades y el alcance del material, que es posible dar solución constructiva a grandes edificaciones que servirán para el desarrollo y la satisfacción de las necesidades más apremiantes del país.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Encontrar una manera eficiente de unir tres guaduas de tal manera que se pueda garantizar que el elemento a compresión trabaja con la inercia de la sección compuesta y no como la suma de las inercias de cada una de las guaduas que conforman su sección transversal.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y ensayar elementos solicitados a compresión compuestos por tres guaduas.

Diseñar diferentes tipos de uniones para amarrar tres guaduas, que garanticen el trabajo de la sección transversal compuesta.

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua a ensayar, para determinar de manera teórica los requerimientos físicos y estructurales de las uniones a diseñar.

Comparar el comportamiento de elementos individuales de guadua sometidos a compresión, con elementos armados por tres guaduas sometidos a la misma sollicitación.

3. INTRODUCCIÓN

La guadua es una planta que por años ha estado ligada a la idiosincrasia de una amplia e importante región del país, y a pesar de esto, no se le ha dado la importancia que merece, ni se le han reconocido sus bondades y el papel importante que ha venido desempeñado en el campo ambiental, económico y cultural de nuestros pueblos, contribuyendo con el desarrollo de múltiples regiones del país, como es el caso de la Región Andina, principalmente el Viejo Caldas.

La guadua por su desarrollo es una planta que brinda grandes beneficios al ambiente y al hombre; los guaduales son generadores de efectos protectores sobre los suelos y las aguas de cualquier cuenca hidrográfica. Los rizomas y las hojas en descomposición conforman en el suelo una capa que actúa como esponja, evitando que el agua fluya de manera rápida y continua, con lo cual se propicia la regulación de los caudales. Con su sistema entretrejido de rizomas y raicillas, la guadua origina una malla de grandes dimensiones que las hace comportarse como eficientes y verdaderos muros biológicos de contención, que controlan la socavación lateral y amarran fuertemente el suelo, evitando la erosión y socavación, haciendo que la guadua sea apropiada para usarla en laderas de cuencas hidrográficas.



Foto No. 1. Guadua en la ronda de un río

Uno de los aportes en el ámbito ambiental, más valiosos de la guadua, es su comportamiento como bomba de almacenamiento de agua, cuyo funcionamiento basado en el principio de "los vasos comunicantes", hace que en época de invierno absorba grandes cantidades de agua que almacena tanto en su sistema rizomático como en el tallo (una hectárea de

guadua puede almacenar hasta 30000 litros de agua¹), luego por efectos de concentración, el agua almacenada es regresada nuevamente al caudal del río en épocas secas, lo cual lleva a pensar que tener un gradual en la ronda de un río, es garantizar la permanencia de su caudal, es decir; tener guadales a las orillas de los ríos o quebradas es poseer tanques de almacenamiento de agua.

Además los guadales ejercen efectos benéficos sobre el medio ambiente brindando albergue a una gran biodiversidad de fauna y flora, constituyéndose en verdaderos ecosistemas. Como elemento paisajista, es innegable el efecto purificador y embellecedor del ambiente. La zona cafetera del país, sus cultivos, sus laderas y la presencia asociada de guadales, se convierte en un marco natural digno de contemplar y disfrutar.

La guadua, además es un elemento simbólico, que hace parte de la memoria histórica de los pueblos colombianos, recoge todo un pasado cargado de costumbres y tradiciones, que enmarcan los más destacados caracteres de la vida e idiosincrasia regional y sin lugar a dudas el más importante: la relación del hombre con su entorno y con la naturaleza, que es necesario rescatar hoy.

Por ser la guadua una planta perenne, de alto rendimiento volumétrico por hectárea, por tener un tiempo relativamente corto de cultivo para poder aprovecharla, por su altura, trabajabilidad y buena durabilidad, esta especie ha sido importante para el desarrollo de la comunidad. Por sus propiedades físico-mecánicas y sus bajos costos, la guadua hace que tenga muchos usos, a tal punto que los habitantes de la zona Andina (Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío y Norte del Valle del Cauca, principalmente) la hayan y la estén utilizando actualmente en: la construcción de vivienda, utensilios de cocina, muebles, instrumentos musicales, puentes, artesanías, canaletas, acueductos, etc., llevando la guadua y sus usos a la cotidianeidad y a la industria, identificando una cultura orgullosa de sus ancestros y costumbres.

La guadua es el bambú nativo que posee Colombia con mayores posibilidades económicas para su utilización en la construcción y la industria, usos que permiten

¹ GIRALDO, Edgar, SABOGAL, Aureliano. "LA Guadua angustifolia KUNTH EN COLOMBIA". Corporación Autónoma Regional del Quindío. Subdirección de Recursos Naturales y educación ambiental. Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua. 1999; p. 9.

disminuir costos de procesamiento, cuando es empleada como materia prima. Por sus excelentes propiedades físico-mecánicas, por su resistencia al ataque de insectos, por su belleza y estética y tal vez la más importante; la diversidad de aplicaciones que se le da, no igualadas por ninguna otra especie forestal, representa una valiosa alternativa económica que ha ayudado a mitigar la problemática económica del área rural.

En la industria, como fuente de materia prima, la guadua se presenta como posible solución ante la demanda de especies maderables productoras de pulpa, y en el campo de la construcción, la guadua, es el bambú más sobresaliente en altura, resistencia, versatilidad, funcionalidad y alta durabilidad, permitiendo así la utilización de sus tallos en las más modernas y hermosas construcciones habitacionales, al igual que la esterilla en la construcción de casetones para aligerar placas de entepiso de grandes construcciones, así como su uso práctico y legendario en la edificación con la técnica del bahareque. La cantidad de usos, significan balances positivos en la economía local de los lugares donde se desarrollan los bosques de guadua.

Como se mencionó anteriormente, la incursión de la guadua dentro de la construcción, es importante no solo porque permite dar soluciones hermosas a grandes proyectos arquitectónicos e ingenieriles, sino porque permite plantear una solución inminente al problema de escasos recursos y de presupuesto que se presenta en el área rural y suburbana, para llevar a cabo obras de interés social para la comunidad, que den soluciones a su necesidad de vivienda. Así que comenzar a rescatar y afianzar la cultura de la guadua, es una inversión a corto, mediano y largo plazo, a corto plazo, porque se permite la ejecución de proyectos que dan solución al problema de vivienda en los sectores y regiones más necesitados del país, tanto urbanos como rurales, generando a su vez fuentes de trabajo y de ingresos para estas mismas personas, ya que la guadua es un material que requiere de la fuerza y el trabajo del hombre para realizar grandes obras.

A mediano plazo porque si se quiere incentivar la cultura de la guadua, es importante conocer como preservarla, conservarla y propagarla, lo cual recíprocamente crea un beneficio a nivel ambiental y ecológico en las rondas de los ríos y en las laderas; y a largo plazo porque tendremos vivienda y edificaciones resistentes, de largos años de vida útil y se dejará un legado de historia recuperable por futuras generaciones, así como un paisaje verde y fructífero para la construcción de un mejor mañana.

4. RESEÑA HISTÓRICA

LA GUADUA, SU HISTORIA EN EL MUNDO Y EN NUESTRO PAÍS

A lo largo de la evolución humana, el hombre se ha destacado por su esfuerzo constante para satisfacer sus necesidades primordiales y procurar mejorar su calidad de vida. En busca de este objetivo, la humanidad ha puesto los ojos en las herramientas y recursos que le ha otorgado la naturaleza, empleándolos como material en bruto, o procesándolos y manufacturándolos para obtener nuevas posibilidades.

Recursos tan vitales como lo son el agua, el aire y la luz solar, han sido herramienta indispensable en el desarrollo de la ciencia y de la tecnología, así como de la ingeniería; y dentro de la gama universal de bienes naturales, las plantas no se han quedado atrás, no sólo suministrando al hombre una solución óptima a una necesidad básica como lo es el alimento, sino que le facilita minuto a minuto el aire que respira, extractos medicinales, fibras para su vestido, etc., y también le otorga una herramienta para la fabricación del papel, de muebles y accesorios, de artesanías y elementos que trascienden culturalmente, así como para la edificación de sus viviendas e infraestructura para la evolución de sus pueblos; este es el caso de una planta, específicamente de una gramínea gigante “el Bambú”, que aflora generosamente en nuestro territorio colombiano, protegiendo las rondas de los ríos, embelleciendo el paisaje, dando cuna a nuestra cultura campesina, y porque no a nuestra ingeniería.

El bambú hace su aparición sobre la faz de la tierra en la era Cretácea un poco antes de la iniciación de la era Terciaria, cuando el hombre apareció, lo cual indica que es una planta milenaria.

La historia del bambú se remonta al comienzo de la civilización en el Asia. El hombre y el bambú han estado estrechamente ligados en China desde tiempos prehistóricos, “lo que se demuestra en el hecho de que uno de los primeros radicales que existieron

(elementos de la ideografía china²), fue un dibujo del bambú, constituido por dos tallos con ramas y hojas que se denominó CHU".³



Figura No. 1. "CHU", caracter chino originado del ideograma empleado por los primitivos chinos para asignar el bambú, el cual estaba formado por dos tallos con ramas y hojas

"El bambú ha sido utilizado de forma milenaria en el Asia, sobre todo en los territorios de Japón, China y la India. En Japón se ha contabilizado más de mil usos que se le puede dar a esta gramínea. Entre los usos se puede resaltar el que se le da al extraer cintas de su corteza que sirven para construir puentes colgantes. El bambú ha servido para una gran diversidad de artesanías, e incluso a manera de enchapes para pisos, como papel, como alimento, en fin la variedad es muy extensa".⁴

"Sin lugar a dudas, China, India y Colombia, son los países que mejores técnicas de construcción han desarrollado a lo largo de historia, empleando el bambú. Los dos primeros en cuanto a lo que se refiere a la construcción de estructuras de toda índole, que incluyen desde cúpulas hasta puentes colgantes. El tercero, Colombia, en lo referente a construcción de vivienda y a la aplicación de este material en el aligeramiento de losas de concreto de grandes edificios; técnicas que han sido ideadas respectivamente por campesinos y constructores del Departamento de Caldas".⁵

"En nuestro continente y más concretamente en el territorio colombiano, el uso del bambú, se remonta al período precolombino, siendo usada, por ejemplo, por los indígenas del Cauca para construir puentes atirantados".⁶

² El ideograma chino fue originalmente basado en la representación pictórica de objetos para los cuales la lengua hablada tenía nombres, lo que posteriormente evolucionó con la invención de las letras o caracteres chinos, atribuido a Ts'ang Chi, ministro de Huang Ti en el año 2.600 A.C.

³ HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Bambú, su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos Ltda.-Editores. Cali, Colombia. 1974. 318 p.

⁴ Ibid.

⁵ HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Manual de Construcción con Bambú. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Construcción rural-1. Estudios Técnicos Colombianos Ltda.-Editores. Bogotá, Colombia. 1981. 70 p.

⁶ AZUOLA GUERRA, Ramón. La Guadua. Vol 1, # 3 En : Revista Anales de Ingeniería. Octubre, 1887.

A la llegada de los españoles al nuevo continente, según recuentos del pasado, América Central y América Latina estaba tapizada de "guadales", tanto así que nuestro descubridor Cristóbal Colón, consignó en sus memorias:

*"Cañas tan gruesas como el muslo de un hombre"*⁷

la anterior frase, no es la única evidencia de la abundancia de los guadales en nuestro territorio latinoamericano y más específicamente colombiano, pues, luego de la época precolombina, nuestro territorio colombiano, fue conquistado por los españoles, quienes a su llegada, encontraron un vasto paisaje cubierto por guadua. El Valle del Cauca, por ejemplo, era un espeso guadua, y los españoles encontraron en estos territorios, tierras fértiles y ríos caudalosos, justo como para emplazarse y comenzar su vida allí; fue así como nació Cartago (Valle). Fray Jerónimo de Escobar (1584), describiría a esta ciudad así: " Este pueblo está cercado de una montaña tan espesa de cañaveral (guadua), de unas cañas muy gruesas, que dura más de diez leguas, no se ve el pueblo fasta questá en él ".⁸

Pero tal vez, el hecho que marca la pauta en el país en cuanto a la utilización de la guadua, como elemento forjador de una cultura, fue durante la colonización antioqueña, de la que aún se encuentran vestigios al internarse en los recuerdos, en las pequeñas callecitas, parques y fondas paisas, que son evidencias del uso de la guadua en los pueblos de la zona cafetera.

La guadua en Colombia fue entonces fundamental en la colonización, contribuyendo con su versatilidad y propiedades a agilizar el proceso de poblamiento y desarrollo de comunidades emigrantes que establecieron pueblos y ciudades que hoy constituyen orgullo para Colombia.

"Desde su llegada al Quindío, los colonos encontraron en abundancia la guadua, especie de bambú gigantesco. La utilizaron para hacer sus casas, sus camas, los instrumentos musicales, la banqueta, la tapia del fogón, el aparador, el tarro de la sal, el cedazo, el parapeto para la piedra de moler, los burros típicos para los juegos de los niños, las trampas para las perdices, el arcón del patio donde amarran la vaca recién

⁷ VILLEGAS, Marcelo. BAMBÚ. Editorial Villegas. Bogotá. 2002.

⁸ HIDALGO LOPEZ. Op. Cit.

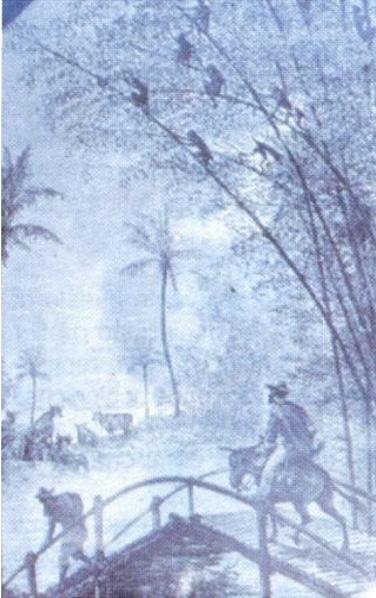


Figura No. 2. *Puente en guadua durante el periodo de la colonización antioqueña*

parida, las estacas y talanqueras del potrero, la canoa que conduce el agua limpia desde las zanjas, el lavadero, la puerta de trampas, la troje, las jaulas, la cuna del recién nacido, la barbacoa o parihuela para el muerto, la cruz del cementerio campesino. En suma: la guadua fue y ha sido el soporte de aquella civilización de dichas tierras, como la porcelana en Asia, la piedra en Europa, el hierro y el cemento en Estados Unidos”.⁹

“La guadua serviría para cercas, acueductos, puentes, como elemento estructural y en la vivienda urbana se usó junto con revoques de cagajón para conformar el bahareque tradicional. En Manizales el bahareque permitió que se desarrollara una arquitectura similar a la republicana europea, pues si bien la naciente

burguesía no tenía los recursos para traer materiales del extranjero, si deseaban que sus edificios se parecieran a los palacetes del Viejo Continente”.¹⁰

Fueron entonces, primero los colonizadores y luego nuestros campesinos y maestros de la construcción los encargados de darle a la guadua la importancia que tiene y que se merece, además del valor de su aplicabilidad. Es responsabilidad de las generaciones actuales y futuras ahondar en el estudio e investigación de este especie para honrar la trayectoria cultural que posee y para afianzar el valor como material multipropósito que es.

⁹ BUITRAGO Jaime. Hombres Transplantados. Manizales 1943. P. 68-69.

¹⁰ ROBLEDO CASTILLO, Jorge Enrique. Un Siglo de Bahareque en el antiguo Caldas. En: CONGRESO MUNDIAL DE BAMBU/GUADUA. (1° : 1992 : Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992. P. 129.

5. MARCO TEÓRICO

La guadua es una gramínea nativa, de amplia distribución en América, donde ha cumplido un importante papel ambiental, sociocultural y económico. En Colombia se le encuentra ampliamente dispersa, conformando rodales (guaduales) casi puros que cumplen indiscutible efecto protector sobre el suelo, las aguas y las rondas de los ríos, contribuyendo a su recuperación y conservación.

La guadua pertenece a la familia de las gramíneas, subfamilia Bambusoideas, supertribu Bambusodae. Se han clasificado más de 40 géneros con cerca de 450 especies. En Colombia se destaca por su abundancia el género "guadua" y la especie "angustifolia".



Foto No. 2. *Guadua Angustifolia*

Botánicamente el bambú está clasificado como *Bambuseae*, una tribu de la extensa familia de las Gramíneas, de la cual también hacen parte plantas como el maíz, la cebada y el trigo.

Por las características de su tallo, se le considera como una de las llamadas plantas leñosas, las que se clasifican en Gimnospermas y Angiospermas. Las Gimnospermas comprenden las coníferas o maderas blandas. Las Angiospermas se subdividen en:

1. Monocotiledóneas, como son los BAMBÚES y palmas.
2. Dicotiledóneas, de hoja ancha y caduca, denominadas maderas duras.

A pesar de que el bambú ha sido una planta conocida y empleada a través de la historia de la humanidad, su clasificación botánica ha sido difícil por las características mismas de la planta, ya que su florecimiento solo se presenta en intervalos de 30, 60, 90 e incluso 100 años después y las flores y los frutos son indispensables para la clasificación.

Un botánico McClure, realizó grandes investigaciones en el continente Americano, para lograr clasificar el bambú de esta región, realizando varias modificaciones. Así es como: "El género *guadua* pasó a ser o través subgénero *guadua* del género *Bambusa* y nuestra especie denominada anteriormente: *Guadua angustifolia* Kunth, se denomina ahora como: *Bambusa guadua*. Humboldt et Bonpland, McClure"¹¹

5.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

"Los primeros especímenes de *guadua* se recolectaron en 1.783, por el español Don José Celestino Mutis (1.732-1.808) durante la Real Expedición Botánica, y en 1.806, fueron estudiados por el taxónomo y naturalista francés Aimé Bonpland (1.773-1.858) y el naturalista y explorador alemán Alejandro Von Humboldt (1.788-1.859). Posteriormente, en 1.822, su compañero de clasificaciones botánicas, y el también alemán Karl Sigismund (1.788-1.850), conocido como Kunth, quien después de adquirir experiencia en la taxonomía de la familia de las gramíneas, decidió que los bambúes de América debían ser agrupados como un género diferente y no dentro del género *Bambusa*, ya que la distribución es distinta al igual que la conformación de la palea, que es una estructura floral (*guadua* con quillas aladas, *bambusa* no). Fue Kunth, quien clasificó la colección de plantas americanas reunidas por Humboldt y Bonpland y publicó en París la sinopsis entre 1.822y 1.825"¹²

"La especie *guadua* pertenece a las angiospermas o plantas con flores, consideradas bastantes complejas a pesar de ser muy familiares; pertenece a una de las familias más antiguas e importantes del reino vegetal "Las gramíneas" abundante en especie; se encuentra en todas las latitudes y se considera familia cosmopolita, posee unos 500 géneros y 8.000 especies"¹³

El Código Internacional de Nomenclatura Botánica ha establecido para la *Guadua* 14 rangos taxonómicos, los cuales se relacionan así:

¹¹ Op. cit. HIDALGO LÓPEZ. P 6.

¹²GIRALDO, H. Edgar Y SABOGAL, O. Aureliano. Una alternativa sostenible: La *Guadua*. Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q., 1999, p. 31.

¹³ Ibid

Tabla No. 1.
Clasificación taxonómica de la guadua

REINO	Vegetal
DIVISIÓN	Spermatofitas
SUBDIVISIÓN	Angiospermas
ORDEN	Glumiflorales
CLASE	Monocotiledóneas
FAMILIA	Poaceae
SUBFAMILIA	Bambusoideae
SUPERTRIBU	Bambusodae
TRIBU	Bambuseae
SUBTRIBU	Guadinae
GÉNERO	Guadua
ESPECIE	Angustifolia Kunth
VARIEDAD	Bicolor
FORMA	Castilla, Cebolla, Macana, Cotuda, Rayada
NOMBRE CIENTÍFICO	Guadua Angustifolia Kunth (Bambusa guadua H et B)

En Colombia existen cuatro especies del Género guadua:

- **Angustifolia:** Que se encuentra distribuida en gran parte de la región central Andina.
- **Amplexifolia:** que se localiza en los llanos orientales, parte norte de la Orinoquía y la costa Atlántica.
- **Superba** y **weberbaueri:** Ubicadas en la Amazonía y corredor chocuano del Pacífico.

Una variedad, llamada guadua angustifolia variedad bicolor; presenta cinco formas o biotipos denominados vulgarmente: cebolla, macana, rayada negra, cotuda y castilla.

“Los biotipos o formas se han diferenciado de acuerdo con las características morfológicas externas, costumbres campesinas, terminología vernácula y condiciones propias de desarrollo de la planta. En la actualidad se desarrollan estudios preliminares a escala local, buscando claridad en cuanto a la categorización genética para su clasificación.

El género guadua se considera el bambú más grande en cuanto a longitud y diámetro se refiere y económicamente el más interesante de América Latina, donde se encuentra ocupando áreas aledañas a ríos y quebradas, y en los valles entre montañas formando las asociaciones llamadas **Guadales**¹⁴.

Según el investigador McClure, entre los bambúes nativos del hemisferio occidental, la Guadua angustifolia, es la más sobresaliente en altura, propiedades mecánicas (resistencia y trabajabilidad), durabilidad de sus tallos e importancia que sus tallos han dado a la economía local de los lugares en donde se desarrolla.

5.2. CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESARROLLO Y CULTIVO DE LA GUADUA (GUADUA ANGUSTIFOLIA)

“La guadua posee amplio rango de distribución geográfica lo cual indica su adaptabilidad, hecho que está determinado por las condiciones edafoclimáticas¹⁵; observaciones técnicas demuestran que el buen desarrollo de la planta está gobernada de manera directa por la calidad del sitio donde se desarrolle, la precipitación y la temperatura”¹⁶.

5.2.1. Temperatura

Es uno de los factores climáticos limitante en la distribución geográfica de esta especie. El rango óptimo oscila entre los 20 °C y los 26°C. Cuando se cultiva en lugares donde los rangos de temperatura se alejan del óptimo, los diámetros y las alturas de los tallos se reducen, afectándose notoriamente el desarrollo vegetativo a temperaturas bajas.

¹⁴ Ibid. P. 33.

¹⁵ Condiciones interactuantes del tipo de suelo y características del clima.

¹⁶ GIRALDO, Edgar , SABOGAL, Aureliano. “La Guadua angustifolia KUNTH EN COLOMBIA”. Corporación Autónoma del Quindío. Subdirección de Recursos Naturales y Educación Ambiental. Centro Nacional para el estudio del Bambú-Guadua. 1999. 18 p.

5.2.2. Latitud

En Colombia la Guadua Angustifolia, crece entre los 0 y los 2000 metros sobre el nivel del mar, pero el desarrollo óptimo se logra entre los 900 y los 1600 m.s.n.m.

5.2.3. Precipitación

Esta especie crece deficientemente en áreas donde la precipitación es inferior a 1200 mm anuales. Los mejores rodales de guadua, se presentan cuando el rango de precipitación se ubica entre los 2000 mm y los 2500 mm por año.

5.2.4. Humedad Relativa

Factor muy importante en el desarrollo de la especie. La humedad que más favorece el desarrollo de los bosques de guadua, está comprendida entre el 75 % y el 85%.

5.2.5. Brillo Solar

La luminosidad para un excelente desarrollo de la guadua debe estar comprendida entre 1800 y 2000 horas/luz/año (aproximadamente de 5 a 6 horas/luz/día).

5.2.6. Vientos

Los vientos en las zonas donde se encuentra la guadua normalmente tienen entre 4.4 m/seg y se les denominan brisas débiles, hasta 12.3 m/seg o sea brisas fuertes. Cuando los vientos superan los 22.6 m/seg, se comienzan a evidenciar daños mecánicos en los tallos de guadua.

5.2.7. Nubosidad

Las nubes son el conjunto visible de partículas minúsculas de agua líquida o de hielo o de ambos a la vez, suspendidas en el aire. Los guaduales presentan mejor desarrollo cuando se tiene en promedio entre 1 y 4 octas con nubes.

5.2.8. Suelos

5.2.8.1. *Características Físicas.*

Los suelos que más favorecen el desarrollo de la guadua son los areno-limosos, francos, franco-arenosos, franco-limosos. Los perfiles de suelos ideales son los que presentan textura gruesas y medias. Suelos pesados o arcillosos no son buenos para el desarrollo de la planta. En suelos ricos en materia orgánica, con buenos drenajes, húmedos pero no inundables, es donde mejor se comporta la guadua.

5.2.8.2. *Características Químicas.*

El pH adecuado para el establecimiento de rodales de guadua es de 5.5 a 6.0, es decir moderadamente ácidos. La mayoría de los guaduales se encuentran en suelos derivados de cenizas volcánicas, con un porcentaje bajo de saturación de bases, pobres en fósforo y mediano en potasio .

5.3. MORFOLOGÍA GENERAL DE LA GUADUA

La estructura de la Guadua está basada en un sistema de ejes vegetativos segmentados, los cuales forman alternamente nudos y entrenudos, que varían en su morfología dependiendo del lugar de la planta al cual correspondan, es decir el rizoma, el tallo o las ramas. En cuanto a lo que corresponde al tallo y su estructura también varía dependiendo de la especie, variedad y/o biotipo a la cual pertenezca, así mismo como en alturas, diámetros, y forma de los nudos facilitándose así su clasificación.



Foto No. 3. Guadua

5.3.1. Rizoma

Como en todas las plantas, el rizoma tiene una función muy importante, no sólo como órgano almacenador de los nutrientes y el alimento necesario para el desarrollo del resto de la planta, sino como elemento básico que permite la propagación de la guadua, la cual se efectúa asexualmente por ramificación de los rizomas.

El rizoma es la estructura soporte de la planta. Consta de dos partes: el cuello del rizoma, que carece de yemas; y del rizoma en sí, que es subterráneo y tiene raíces, yemas y brácteas.

El investigador McClure¹⁷, en 1966 clasificó los rizomas del bambú en dos grupos principales y uno intermedio, de acuerdo con la morfología de los mismos. El primer grupo, los rizomas Paquimorfos (Simpodial y Cespitoso), el segundo el Leptomorfo (Monopodial), y el tercero Anfipodial.

Algunos de los géneros de bambúes, pertenecientes al grupo Paquimorfo, son : *Bambusa* (que incluye el subgénero *guadua*), *Dendrocalamus*, *Elytosthachys*, *Gigantocioa*, *Oxytenanthera*. Los bambúes pertenecientes a este grupo corresponden en su mayoría a especies tropicales, sus rizomas se denominan paquimorfos, por ser cortos y gruesos, de forma más o menos curva y diámetro generalmente mayor que el del culmo, los entrenudos son más

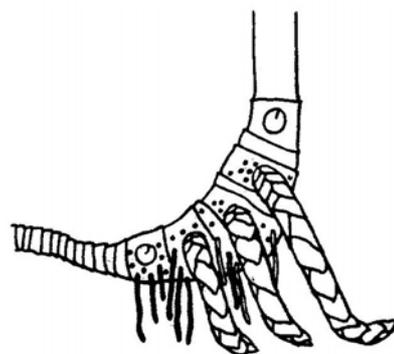


Figura No. 3. Rizoma paquimorfo

anchos que largos, sólidos y asimétricos, se caracterizan por su yema apical que termina originando un tallo aéreo, y las yemas laterales continúan el crecimiento del rizoma repitiendo el mismo sistema de ramificación. Este tipo de desarrollo hace que los rodales de la *Guadua* sean densos. Normalmente los rizomas alcanzan profundidades de anclaje entre 1 y 3 metros.



Foto No. 4. Reproducción asexual en rizomas paquimorfos



Foto No. 5. Rizomas paquimorfos de *guadua*.

¹⁷ Citado por HIDALGO LOPEZ. Op. Cit.

Una de las ventajas que presenta el bambú, debido al tipo de rizoma que posee, el cual es fuerte y abundante, es que forma un sistema que se entreteteje en el suelo, ayudando de esta forma a la conservación del suelo, principalmente en las rondas de los ríos, asimismo, evita la erosión que se produce por fuertes vientos, escorrentía o desmoronamientos del terreno, contribuyendo así a la estabilización de laderas.

5.3.2. Tallo ó Culmo

El culmo es el eje aéreo segmentado que emerge del rizoma y es la porción más útil del bambú. Los tallos de bambú se caracterizan por tener forma cilíndrica y entrenudos huecos, separados transversalmente por tabiques o nudos que le proporcionan mayor rigidez, flexibilidad y resistencia.

El tallo de la guadúa es un sistema modular el cual consta de nudos y entrenudos dispuestos axialmente, estos módulos varían según la especie, de diámetro, espesor de pared, densidad y longitud de entrenudo con la altura del tallo.



Foto No. 6. Culmo de una *guadua angustifolia kunth*

El diámetro y el espesor de la pared del culmo, disminuyen con la altura, en caso contrario la densidad y la longitud entre nudos aumenta con ésta. Su forma es cilíndrica y esbelta y puede alcanzar alturas promedio de 18 - 20 metros.

“Dentro del género de la guadua, se diferencian dos grupos diferentes, las especies de culmos ascendentes y trepadores, y las especies de culmos erectos, al que pertenece la *Guadua Angustifolia*, que se caracterizan por tener hábito erecto, ligeramente arqueadas en la punta, rizomas paquimorfos bien desarrollados, culmos gruesos leñosos, generalmente huecos, de pared gruesa o delgada, con altura que oscila entre los 7 y 20 metros, con diámetros entre 5 y 19 centímetros y rama por nudo con un ángulo de inclinación de 45 ° a 50 ° ”¹⁸

¹⁸ LONDOÑO PAVA, Ximena . Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo. En : CESPEDSIA, Vol. 19. Nos 62-63 (enero – diciembre 1992). Cali, Colombia; p. 113

El tallo se origina en las especies del grupo paquimorfo, en el ápice del rizoma, y el proceso de desarrollo del tallo se da, a partir de que brota del suelo, lo cual es la salida del rebrote ó cogollo, el cual lleva intrínseco la cantidad de nudos que va a poseer y con el máximo diámetro que tendrá de por vida, luego el crecimiento se realiza por el alargamiento o elongación de los entrenudos, comenzando por el inferior y terminando por el último superior, con el cual termina el crecimiento del tallo, donde posteriormente crecen las ramas de las yemas en los nudos y sus hojas. Al alcanzar su desarrollo se inicia un proceso de sazónamiento ó maduración, donde llega a su mejor grado de aprovechamiento esto ocurre entre los 3 y 6 años.



Foto No.7. Culmo de una *guadua angustifolia kunth*

Debido a su tejido delicado, el tallo está protegido con brácteas u hojas de forma triangular que lo recubren, las cuales se originan en cada uno de los nudos que se van formando, el crecimiento del entrenudo se sabe cuando termina, porque la bráctea o cubierta que protege al tallo se desprende ligeramente del nudo inmediatamente inferior.

5.3.2.1. Anatomía

El tallo está constituido por aproximadamente 50% de parénquima, 40% de fibra ó tejido esclerenquimatoso y 10% de tejidos conductivos (vasos y tubos cribosos), el porcentaje de esta composición depende de la especie, la mayor o menor cantidad de haces vasculares y su proporción con el resto de elementos que la componen, determinan su comportamiento ante los esfuerzos de tracción, compresión o flexión. La distribución de las fibras de la Guadua muestra un patrón definido a lo largo y ancho del tallo, así el porcentaje de fibras es significativamente mayor; en dirección vertical la cantidad de fibras aumenta porcentualmente desde la base hacia la punta y horizontalmente disminuyen del exterior al interior, ésto se puede correlacionar con la densidad y la resistencia de la guadua. Las fibras son largas y



Foto No. 8. Sección transversal del tallo de guadua

ahusadas en los extremos y generalmente mucho mas largas que en las fibras de las maderas duras, las fibras mas cortas se sitúan en los nudos y las mas largas en el centro del entrenudo.

La epidermis es dura y cutinizada, cubierta con una capa cerosa que evita la evaporación del agua contenida en el tallo, su dureza es extraordinaria y es debido a las incrustaciones de sílice, lignina y cutina (algunas poseen tanta cantidad de sílice que se usan como piedras de amolar).

5.3.2.2. Yema

En el culmo, se ubica por encima de la línea nodal y en posición dística¹⁹. Rompe su inactividad cuando el culmo completa el crecimiento apical. En el caso de la guadua hay una sola yema por nudo.



Figura No. 4. Nudo del tallo con la yema de las ramas

5.3.2.3. Ramas

Se originan en la línea nodal, por encima de esta o sobre un promontorio. En el caso de la guadua las ramas basales se modifican y llegan a transformarse en espinas. Las ramas apicales del culmo tienen alto contenido de fibra y pueden aprovecharse en la fabricación del papel.



Figura No. 5. Brote de una rama espinosa en un nudo interior del tallo

5.3.2.4. Hoja Caulinar

Es la que nace en cada nudo del culmo y tiene como función proteger la yema que da origen a las ramas y al follaje. Consta de dos partes: la vaina o parte basal y la lámina o parte distal, en el caso de la guadua es continua.

5.3.2.5. Follaje

Es la estructura básica en el proceso de fotosíntesis, está constituido por vaina, lámina y ápices.

¹⁹ Se aplica a las hojas, flores y espigas dispuestas de modo que unas miran aun lado y otras al lado opuesto

5.4. INFLORESCENCIA



Foto No 9. Inflorescencia en *Guadua Angustifolia*.

La inflorescencia en los bambúes, tiene como unidad básica estructural la espiguilla. La guadua tiene inflorescencia indeterminada que se prolonga indefinidamente mediante producción progresiva de ramas; además tiene floración esporádica que es cuando todos los miembros de una generación determinada, con un origen común, entran gradualmente a la etapa reproductiva en diferentes tiempos o intervalos regulares, luego de esto la planta se amarilla ligeramente pero emite nuevos brotes; la planta no muere.

5.5. FASES DE DESARROLLO DE LA GUADUA

La Guadua tiene fases de desarrollo básicas las cuales son:

Rebrote: Entre los 0 – 6 meses de edad. Se considera como el primer individuo de la fase de desarrollo. Durante los primeros 30 días el crecimiento alcanza tasas de 4 – 6 cm en 24 horas, y el 60 % de éste se realiza en horas nocturnas, condición que obedece a la presencia de auxinas. Después de 90 cm el renuevo se estabiliza en un promedio de 9 – 11 cm de crecimiento en 24 horas; Se encuentra revestido completamente de hojas caulinares que varían según el sitio y



Foto No. 10. Rebrote

las condiciones climáticas donde se desarrolla el renuevo. En los primeros 30 días de su crecimiento, se puede usar como alimento humano y también se puede aprovechar este tiempo para formalearla con el fin de inducirle formas distintas a su sección con fines decorativos.



Foto No. 11. Guadua joven "viche"

Guadua Joven ó viche: Entre los 6 meses – 3 años de edad. Esta fase se inicia cuando las hojas caulinares de la parte apical del culmo comienzan a desprenderse, dando paso a las ramas primarias y consecutivamente a las secundarias.

Se usa en esta edad, debido a la poca dureza que posee por carecer de lignificación completa; se limita a la hechura de canastas, paneles tejidos y esterilla. Se reconoce puesto que posee un color verde intenso y lustroso, su superficie es limpia de musgo y nudos con bandas nodales de color blanquecino, donde además se encuentran la yemas.

Guadua madura ó sazónada: Entre los 3 y 6 años de edad, en esta fase la Guadua alcanza su mayor resistencia y dureza; este es punto ideal para su uso en la construcción, también se hacen baldosas laminadas y tablillas para entrepiso laminado. Se caracteriza por la desaparición en el tallo del lustre en el entre nudo, color verde oscuro y la aparición de manchas de hongos color gris – claro, de forma redondeada a oblonga, con diámetros hasta de 3 cm sobre la superficie.



Foto No. 12. Guadua madura "Hecha"



Foto No. 13. Guadua seca

Guadua sobremadura: De los 6 años en adelante, esta es una Guadua que no fue aprovechada en su momento, deja de ser productiva y tiende a rajarse muy fácilmente, no resiste ni siquiera los clavos, ni golpes muy fuertes con el martillo, se reconoce porque pierde el color verde oscuro de la Guadua madura y en cambio toma un color naranja y no hay presencia de follaje lo cual indica fisiológicamente que es inactiva.

5.6. PARTES DE UNA GUADUA Y SU UTILIZACIÓN

De acuerdo con el Centro Nacional para el estudio del Bambú - Guadua , la guadua se divide en seis partes a lo largo de su sección longitudinal (Tabla No. 2, Figura No. 6), donde cada una presenta un uso particular:

Tabla No. 2.
Descripción y utilización de la guadua.

PARTE	DESCRIPCIÓN	UTILIZACIÓN
RIZOMA	Es un tallo modificado, subterráneo, que conforma el soporte de la planta. Popularmente se conoce como "caimán". Las raíces o rizomas se pueden encontrar hasta 2.0 metros de profundidad.	En decoración y juegos infantiles.
CEPA	Es la sección basal del culmo con mayor diámetro, la distancia de sus entrenudos es corta, lo cual le proporciona una mayor resistencia. Su longitud es aproximadamente de 3.0 metros	Se utiliza para columnas en construcción, cercos y entibados; para estabilidad de taludes tiene gran uso, dada su sección. En cuanto al comportamiento frente a esfuerzos de flexión, esta parte de la guadua se comporta muy bien, gracias a la corta distancia entre nudos.
BASA	Parte de la guadua que posee mayores usos, debido a que su diámetro es intermedio y la distancia entre nudos es mayor que en la cepa; es la parte del culmo de la guadua que más se utiliza; tiene una longitud aproximada de 8.0 metros	Si el tallo es de buen diámetro se utilizan también para columnas, además de esta sección se elabora la esterilla, la cual tiene múltiples usos en construcción de casetones, paredes, postes y para formaletear. Es el tramo más comercial de la Guadua.
SOBREBASA	El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor comparada con la basa. Es un tramo de guadua con buen comercio, debido a su diámetro que permite buenos usos. La longitud es de aproximadamente 4.0 metros.	Utilizada como elemento de soporte en estructuras de concreto de edificios en construcción (puntal). También se emplea como viguetas para formaletear vaciados de losas, vigas y columnas.
VARILLÓN	Sección de menor diámetro. Su longitud tiene aproximadamente 3.0 metros	Generalmente se utiliza en la construcción como apuntalamientos y como soporte (correa) para disponer tejas de barro o paja.
COPA	Es la parte apical de la guadua, con una longitud entre 1.20 a 2.0 metros.	Se pica en el suelo del guadual como aporte de materia orgánica.

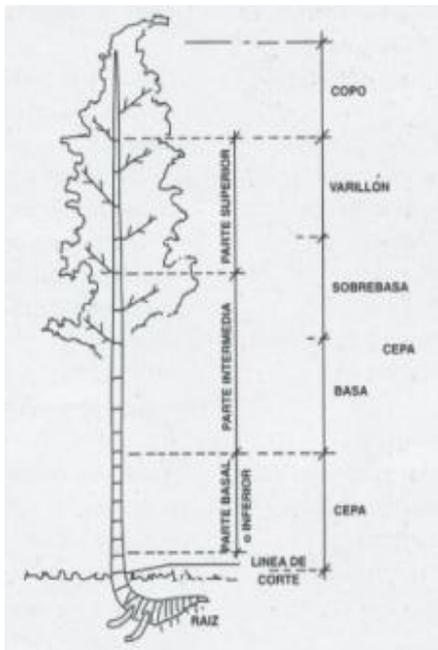


Figura No. 6. Sección longitudinal del tallo



Foto No. 14. Guadua apto para realizar el corte.

5.7. CORTE

Para llevar a cabo el corte en un guadua, es indispensable tener pleno y certero conocimiento de la edad del mismo, ya que de acuerdo con la edad de la guadua, sus características y propiedades tanto físicas como mecánicas cambian, incidiendo en forma decisiva y evidente en la resistencia y utilización que se pueda realizar de la misma.

La edad adecuada para efectuar el corte, con objetivos de una futura utilización para la construcción, se encuentra entre los 3 y 5 años, ya que cuando se corta una guadua con edad menor a los tres años, es decir cuando es aún muy joven (verde), la resistencia que proporciona es menor, ya que en ésta etapa el contenido de humedad es alto y al secarse, la contracción producida, ocasiona rajaduras y deformaciones indeseables al querer utilizar la guadua como material de construcción, así mismo las guaduas jóvenes son más susceptibles al ataque de insectos xilófagos por su alto contenido de almidón y los nuevos brotes serán pequeños y abundantes; si los tallos tienen edad mayor a los cinco años, la resistencia



Foto No. 15. Forma adecuada de realizar el corte

comienza a disminuir lentamente y los nuevos brotes serán largos pero menores en cantidad.

“Un tallo de edad entre los 3 y 5 años se reconoce porque tiene ausencia de hoja caulinar, hay presencia de follaje y sobre el tallo hay presencia de manchas de algas en buena cantidad”²⁰

El corte en el tallo de la guadua debe realizarse después del primer cañuto completo que sale de tierra, aproximadamente a una altura entre 15 y 30 centímetros sobre el nivel del suelo, con la precaución de que quede sobre un nudo (donde termina el nudo), con el objetivo de evitar que el agua se empoce, lo cual generaría posteriormente que comience a podrirse el tallo, afectando consecuentemente al rizoma. El corte debe procurar hacerse lo más limpio posible para lo cual se usa machete o una sierra.



Foto No. 16. Buen corte de la guadua



Foto No. 17. Corte en pocillo

Dentro de la cultura campesina Colombiana, más exactamente en la región andina (Antiguo Caldas), ha existido un sin número de creencias acerca del tratamiento que se debe dar a la guadua, pero sin duda alguna la más representativa y significativa, es la que tiene que ver con la época de corte, el cual dicen los campesinos debe realizarse en cuarto menguante en las horas de la madrugada. Así se obtienen guaduas más resistentes al ataque de insectos xilófagos y con mejores propiedades mecánicas.

²⁰ MARTINEZ CÁCERES, Dixon Emmanuel. Puentes en do mayor (Tesis de grado). En: Congreso Mundial de Bambú / Guadua. (1° : 1992: Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira; 1992; p.173.

En el mundo se han hecho algunas investigaciones para determinar la veracidad de esta creencia, según Hidalgo López:

“En los experimentos realizados en Malabar del sur y en Coimbatore del Norte, no fue posible establecer relación alguna entre el ataque de insectos y los tallos cortados en creciente o en menguante. Sin embargo, los experimentos realizados en Nilgiris demostraron lo contrario, es decir que los bambúes cortados en menguante, 2 ó 3 días después de la luna llena, eran menos propensos al ataque de insectos que los cortados en creciente”, lo que está de acuerdo con la creencia que existe en América, particularmente en Colombia.

En las diversas investigaciones realizadas en el Forest Research Institute India, con el fin de obtener alguna relación entre las fases de la luna y el ataque de los insectos, no se encontraron resultados positivos.

Por otra parte Plank realizó varios experimentos sobre este asunto, en la Federal Experiment Station de Puerto Rico, utilizando la bambusa vulgaris y no encontró suficiente evidencia para justificar la creencia.”²¹

5.8. CURADO Y SECADO

El bambú una vez cortado y en particular si el tallo es joven o menor de tres años, es atacado interiormente por insectos xilófagos como el *Dinoderus minutus*, que atraído por el almidón que se deposita en la pared del tallo, construye largas galerías a lo largo de la misma dejándolo inservible.

Con el fin de que los tallos de la guadua sean más duraderos y menos propensos al ataque de los insectos y hongos, el bambú después de cortado, debe someterse a un tratamiento de curado, que tiene como fin reducir o descomponer el contenido de almidón y humedad de los tallos, o a un tratamiento con preservativos químicos contra los insectos y hongos.

Este procedimiento de curado, se puede llevar a cabo mediante la aplicación de varios métodos:

²¹ HIDALGO, López O. BAMBÚ Su cultivo y aplicaciones. Cali: Estudios técnicos Colombianos Ltda., 1974. p. 57,58.

Curado en el Guadual o en la Mata: Es el procedimiento más utilizado y recomendado por su bajo o ningún costo ya que es un proceso natural y no mancha los tallos. Este método consiste en cortar el tallo (se deja con ramas y hojas) e inmediatamente dejarlo apoyado a otros bambúes vivos lo más vertical posible, y sobre una piedra, plástico o sobre la punta de otro rizoma que lo separe del suelo, para evitar que absorba la humedad del suelo y para que las hojas sigan transpirando, haciendo que el secado sea gradual y de adentro hacia fuera. En esta posición el tallo cortado se deja por un tiempo no menor de 4 semanas, luego se cortan sus ramas y hojas y se deja secar dentro de un área cubierta bien ventilada. Este método ha sido hasta ahora el más recomendable, pues los tallos no se manchan, conservan su color, no se rajan y no son atacados por insectos y hongos.

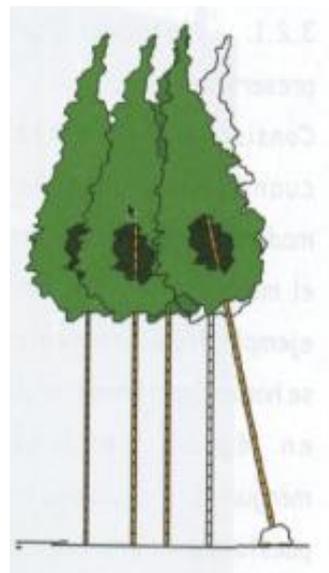


Figura No. 7. Curado en la mata

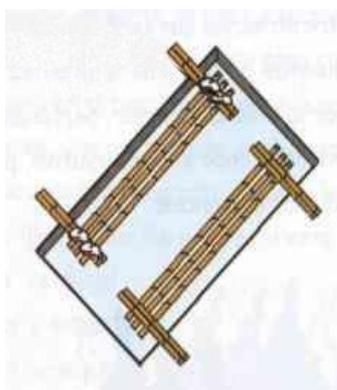


Figura No. 8. Curado por inmersión en el agua

Curado por inmersión en agua: este método consiste básicamente en sumergir los tallos recién cortados en agua, ya sea en un tanque o en un río y se dejan allí por un periodo no superior a cuatro semanas, posteriormente se sacan y se dejan secar por algún tiempo. Este método a pesar de ser muy utilizado es poco efectivo, además los tallos se manchan y si permanecen mayor tiempo del requerido en el agua pierden resistencia y se vuelven quebradizos.

Curado con calor: se realiza colocando horizontalmente los tallos de guadua sobre brasas a una distancia apropiada para que las llamas no las quemen, girándolas constantemente. Este tratamiento se hace por lo general a campo abierto. Es un proceso efectivo, pero de mucho cuidado con la distribución del calor, ya que se pueden producir esfuerzos diferenciales del interior al exterior lo cual causa agrietamientos y fisuras en el tallo, además se puede quemar.

Curado con humo: el método consiste en ahumar los tallos de guadua con la ayuda de una hoguera, se colocan horizontalmente en el interior de una cámara sobre un fogón u hoguera, hasta que queden cubiertas exteriormente de hollín, con el objetivo de que alcancen una humedad del 10%. Se afirma que el humo produce la cristalización de la lignina, trayendo como consecuencia una mayor resistencia al ataque de insectos, impermeabilidad y mejores propiedades mecánicas.

5.9. TRATAMIENTOS QUÍMICOS (PRESERVACIÓN DE LA GUADUA)

El problema más grande que presentan las estructuras que tienen guadua es el de la preservación, pues son muy susceptibles al ataque de insectos, la humedad y el sol. Para estos problemas hay varios tipos de solución dependiendo de la utilización de la guadua o los agentes a los que se va a ver expuesta.

Para preservar la guadua del ataque de insectos y hongos se trata con productos químicos insecticidas y funguicidas. De acuerdo al medio de disolución de los preservantes se identifican dos grupos diferentes : los Oleosolubles como creosota alquitranada, aceite de antraceno, soluciones de cerosota, etc, y los Hidrosolubles que son sales disueltas en agua y entre sus ingredientes activos están el cloruro de zinc, el dicromato de sodio, el bórax, el ácido bórico entre otros.

Para un buen aprovechamiento de este recurso natural, se debe tratar de preservar en el cultivo y en el almacenamiento con la ayuda de productos químicos que lo protejan de plagas de insectos xilófagos (Insecticidas) y de hongos (Funguicidas). Estos productos por lo general ya vienen mezclados y se consiguen fácilmente en el comercio. Deben ser solubles en agua para una mejor impregnación y que no afecte la estructura de la guadua, sus propiedades físico-mecánicas, ni su apariencia (color, superficie).

Para realizar la inmunización existen diferentes métodos como son el aprovechamiento de la transpiración de las hojas, por inmersión, por el método Boucherie simple o por el método Boucherie modificado.

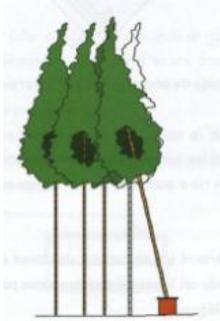


Figura No. 9. Método de transpiración de las hojas

Método de la transpiración de las hojas: Una vez que se realiza el corte, aprovechando el método del curado en la mata, se coloca el tallo en posición vertical y se cambia la piedra por un recipiente que contenga un preservativo (5% de DDT y talco), en el cual se deja sumergido un extremo del tallo, dicho preservativo es absorbido hacia arriba por la transpiración de las hojas; se mantiene durante el tiempo de curado.

Por inmersión: Como su nombre lo indica, se sumergen los tallos cortados por un tiempo mayor a 12 horas, en un tanque con una solución que contenga los productos químicos preservativos a ser utilizados en el tratamiento. Para que la guadua quede totalmente cubierta con el preservativo, se colocan piedras grandes en los extremos para que permanezca sumergida.



Foto No. 18. Método de inmersión

Método Boucherie simple (por gravedad): Consiste en llenar el entrenudo superior con preservante, dejando el tallo en posición vertical hasta que el químico baje a lo largo de las paredes, ya que por acción de la gravedad empuja y desplaza la sabia ocupando su lugar. También uno de los extremos puede conectarse a un tubo de caucho que conduce el preservativo de un tanque ubicado a una altura mayor, hacia el tallo de la guadua. Es un método que puede demorarse varios días de acuerdo con las dimensiones del tallo, por lo cual es poco usado a escala comercial.

Método Boucherie modificado (por presión): Es similar al método simple, se diferencia porque el tanque trabaja a presión. Este método es mucho más rápido (se requieren pocas horas para culminar el proceso) y efectivo, pues hay una mayor penetración y absorción del preservativo; además se pueden tratar varias guaduas al tiempo.



Foto No. 19. Método de Boucherie modificado.

El uso de preservativos y productos químicos aplicados en forma externa sobre la superficie de la guadua con brocha,

no es muy recomendable, debido a que no existe una adecuada penetración hacia el interior del tallo, además se puede lavar fácilmente con la lluvia si queda la guadua expuesta a la intemperie.

6. ANTECEDENTES

Aunque el bambú a través de la historia del hombre, haya sido reconocido y utilizado, al igual que estudiado, la investigación de la guadua es relativamente corta. En nuestro país, en octubre de 1887, hace más de un siglo, Ramón Guerra Azuola publica un artículo en el volumen 1, #3 de la revista Anales de Ingeniería; publicación de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, en el cual destaca la necesidad de iniciar investigaciones de la guadua para considerarla como material de construcción:

“La guadua, como material de construcción, no ha sido estudiada todavía, según creemos, no obstante el frecuente uso que de ella hace el pueblo y los inmensos recursos que pudiera prestar a los ingenieros colombianos.”²²

Pero la inquietud por este material, continuó albergándose en el pensamiento de los colombianos, fue entonces en la década de los 60's, cuando un arquitecto y antiguo profesor de la Universidad Nacional de Colombia; Oscar Hidalgo López, manifiesta su inquietud :

“¿Cuál ha sido la razón para que nuestros botánicos y científicos no se hubieran preocupado hasta ahora por estudiar la planta que ha sido mas útil al país y que más contribuyó al desarrollo económico y social de nuestra civilización pasada y presente?, la única razón que he podido encontrar es, que la idea de “pobreza” con la cual se asocia a la guadua, por ser el material mas empleado por la gente de pocos recursos económicos en la construcción de sus viviendas y tugurios, ha contribuido a crear en el común de la gente un rechazo subconsciente hacia todo lo que tenga que ver con vivienda y artesanía de guadua, como también a toda idea o interés que surja por estudiar esta planta desde el punto de vista botánico, económico o estructural”²³.

²² AZUOLA GUERRA, Ramón .Revista Anales de ingeniería. Sociedad colombiana de ingenieros. Volumen 1, #3. 1887.

²³ Op. Cit. HIDALGO LOPEZ, Oscar. p.2

Este arquitecto es reconocido en el ámbito mundial por sus investigaciones y actualmente trabaja con el INBAR (International Network of Bamboo And Rattan) para publicar una enciclopedia que recopilará todo su conocimiento e investigación acerca del bambú. Este arquitecto ha investigado el bambú desde la botánica, la silvicultura, su inmunización, su uso en la industria del papel, en la construcción, en la fabricación de artesanías. También ha incursionado en construcción de vivienda y muebles.

Oscar Hidalgo López, promueve la conformación del CIBAM (Centro de Investigación de Bambú – Madera de la Universidad Nacional de Colombia), adelantó importantes investigaciones en el uso constructivo de la guadua rolliza, cintas de bambú, en el tema del concreto reforzado con bambú, fabricó guadua laminada e incursionó en el terreno de domos geodésicos fabricados con bambú. Dentro de su labor como docente y como investigador de la Universidad Nacional de Colombia, alentó e inspiró numerosos estudiantes a trabajar con la guadua, entre ellos cabe destacar las tesis de grado de Martín y Mateus (1981)²⁴ y la de Carvajal, Ortegón y Romero (1981)²⁵.

Oscar Hidalgo López es reconocido a nivel mundial como un gran conocedor en el tema, fue partícipe de un importante proyecto llevado a cabo en Puerto Rico a partir del año de 1986: el PNB “Proyecto Nacional del Bambú”; desde sus inicios y hasta el presente, él ha sido concebido como líder del proyecto piloto para prevenir la deforestación e incentivar la construcción de vivienda con material alternativo, económico y sostenible, en beneficio de personas de escasos recursos. El PNB se inició con ayuda de asesores internacionales y el apoyo de la ONU; en su primera fase se recolectaron experiencias principalmente de Colombia y Ecuador; en las dos fases siguientes se desarrolló un programa intensivo de construcción de áreas rurales, incluyendo capacitación técnica, cultivos masivos de bambú, organización de la comunidad y de los trabajos, asesoría ambiental, tecnológica, producción de muebles y artesanía para la exportación.

²⁴ MARTÍN, José Virgilio y MATEUS, Lelio Rafael. Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla. Bogotá, 1981. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola; p. 104.

²⁵ CARVAJAL, William N., ORTEGON, William O. y ROMERO, Carlos J.. Elementos estructurales en bamboo. Bogotá, 1981. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil; p.91.

El proyecto persigue la utilización sostenible del bambú como material de base para la realización de un programa de vivienda de interés social y para la industrialización y comercialización de los productos complementarios. Hasta el año de 1998 el proyecto había construido 3000 soluciones de vivienda para familias pobres de áreas rurales, con más de 300Ha de bosques de Bambú en zonas donde antes no los había. En diciembre de 1990 el PNB había concluido un conjunto de 30 viviendas en la comunidad de Río Banano al sur de Puerto Limón.

Dentro de este proyecto PNB, existe otro participante destacado, el holandés Jules Janssen de la Universidad Técnica de Eindhoven, quien ha llevado la investigación de este tema hasta Europa; en donde no existe el bambú. El ha investigado sobre varios bambúes en el mundo con el objetivo de elaborar una norma técnica sobre el uso de este material. Ha desarrollado un trabajo con cerchas y uniones en territorios deprimidos de África y Asia ; de forma deliberada no trabaja con el acero y el concreto, opta por diseñar sus uniones y cerchas con tarugos y cabuyas , parte de las uniones realizadas en este proyecto de grado, contemplan la utilización de bambúes de menor diámetro y cuerdas de fibras sintéticas para la elaboración de una solución al problema que acomete este proyecto. En su obra²⁶ "Building with Bamboo", Jassen señala nueve tipos de unión para construcción de cerchas.

El Proyecto Nacional del Bambú, consiste principalmente en un plan para promover la construcción de vivienda popular empleando guadua. Para este propósito Costa Rica tuvo que importar la guadua desde otros países de Latinoamérica. El proyecto fue todo un éxito, y "esto se demostró en el sismo del 22 de Abril de 1991 con un terremoto de magnitud de 7.5 en la escala de Richer que sacudió la costa atlántica de Panamá y Costa Rica ocasionando numerosos daños en puentes, carreteras, edificios, cañerías, tanques de almacenamiento e instalaciones industriales. En la comunidad de Río Banano la intensidad Mercalli fue de IX. En esta zona se produjeron vibraciones tan fuertes que ocasionaron licuefacción de suelos, destruyendo completamente la carretera, tumbando palmeras y haciendo colapsar viviendas de madera e incluso de mampostería estructural; sin

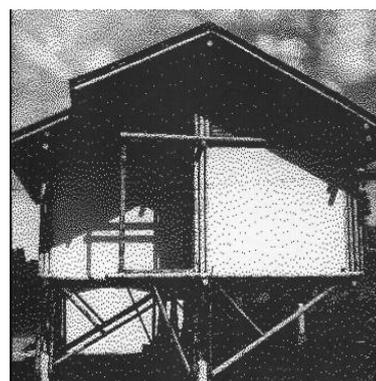


Foto No. 20. Casa del Proyecto Nacional del Bambú, Costa Rica

²⁶ JANSSEN, Jules. Bulding with bamboo. Intermidiate Technology Publications, London. 1995

embargo ninguna de las 30 viviendas sufrió mayor daño, incluso en aquellos lugares en que había fisuras en el suelo."²⁷

En la actualidad otro colombiano destacado en el ámbito mundial en construcciones de guadua es el arquitecto manizalita Simón Vélez. Aunque lleva menos tiempo que Oscar Hidalgo López en la construcción con guadua (15 años) sus diseños y construcciones son más osados, utilizando la guadua



Foto No. 21. Pabellón Zeri réplica hecha en Manizales.

esencialmente a esfuerzos de compresión y construyendo estructuras en arco combinadas con voladizos (hasta de 6 o 7 metros). Se ha empeñado en demostrar que la guadua puede competir como material de construcción con otros materiales tradicionales como el concreto, el ladrillo, el acero y la madera; a la guadua se le ha dado el nombre de Acero Vegetal y prueba de ello es el pabellón de Zeri construido para la feria mundial de Abril de 2000 en Expo-Hannover, Alemania. La estructura cuenta fundamentalmente de guadua, está construida también con maderas como aliso, chusque, arboloco y sapan (Foto No. 21). Para obtener la licencia de construcción alemana, se construyó en Colombia una réplica exacta del pabellón cerca de la ciudad de Manizales, allí el alemán Klauss Steffens, director del Instituto de Estática Experimental de la Universidad de Bremen, visitó Manizales para someterla al viento, nevadas y a las más duras pruebas de resistencia. Esta especie vegetal comprobó que sí es el "acero vegetal" como señala Vélez, soportó entre otras pruebas cargas de 400 Kilogramos por metro cuadrado; el Pabellón fue denominado por los alemanes como "Pabellón de alta tecnología".

Con el terremoto ocurrido en nuestro país el 25 de enero de 1999 en el eje cafetero, la guadua cobra importancia, y es recordada por los colombianos. Las imágenes en

²⁷ GUTIERREZ G., Jorge A. Comportamiento Estructural y resistencia sísmica de las viviendas de bambú. En CONGRESO MUNDIAL DE BAMBÚ / GUADUA. (1° : 1992 : Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992; p. 161

televisión y en la prensa evidenciaron como grandes moles de concreto quedaron por el suelo, a la vez que humildes ranchos y tugurios de guadua se mantuvieron en pie, conservando ilesos a sus moradores.

Esta catastrófica tragedia, llevó a que se reconociera a la guadua como un material que podía ser utilizado en la construcción, que había demostrado su gran capacidad sismorresistente, tanto así que desempeñó y desempeña aun un papel protagónico en los proyectos de reconstrucción del eje cafetero, en la construcción de cambuches y alojamientos temporales, y en municipios como Córdoba, Pijao y en corregimientos como Barcelona y Quebrada Negra, a través de la participación de ONGs y otras organizaciones nacionales y extranjeras se plantearon importantes soluciones de vivienda en este material²⁸.

En el proyecto de grado titulado “Determinación de la Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua de Castilla” por Martín y Mateus ²⁹(1981), cabe destacar que de las curvas Esfuerzo – Deformación, encontraron un comportamiento Elástico del material; además de encontrar el PSF (Punto de Saturación de la fibra) para la guadua, donde por debajo de este punto las propiedades mecánicas a compresión varían inversamente con el punto de saturación de la fibra y por encima de éste permanecen constantes. Aplicaron una curva de cuarto Grado que relaciona el Esfuerzo máximo a compresión con la relación de esbeltez para columnas cortas y una fórmula de Euler para columnas largas. Llegaron a la conclusión de que los valores de las propiedades mecánicas a compresión en función del contenido de humedad fueron más altos para el grupo de edad No. 2 (guaduas de 3 a 5 años), y más bajos para el grupo de edades No 1 (guaduas de 1 a 3 años), para una humedad del 12% se obtuvieron los siguientes datos³⁰:

Tabla No. 3.

Resumen de resultados del trabajo de grado “Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua de Castilla” por Martín y Mateus

Grupo de edad	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo en el Límite Proporcional (Kg/cm²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm²)
1 – 3 años	505	399	105.80
3 – 5 años	661	524	121.53
5 o más años	561	466	101.43

²⁸ Fotos No. 81 y 82 del Anexo B.

²⁹ Op. Cit. MARTÍN y MATEUS. p.145

³⁰ MARTÍN, Op. Cit.

Sobre el comportamiento a flexión los estudiantes López y Silva³¹ de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Manizales aparte de sus objetivos principales realizaron algunos ensayos con luces variables y los compararon con una base de datos de ensayos a flexión desarrollada por los estudiantes Gómez y Rubio³² de Ingeniería Civil de la Universidad Javeriana que incluían ensayos a flexión para luces fijas en 0.80m, 1.00m y 1.50m. Sin embargo, en dicho estudio no se pudieron establecer recomendaciones de los esfuerzos de trabajo a flexión porque no se tomaron las precauciones necesarias para evitar el aplastamiento de la sección transversal; éste fenómeno se ve reflejado en la dispersión de los resultados que se resumen a continuación:

Tabla No. 4.
Resumen de resultados del trabajo de grado "Esfuerzos de trabajo para elementos estructurales en guadua" por Gómez y Rubio.

Longitud (m)	Probetas	σ promedio (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	C.V.
0.8	34	189	76.5	0.40
1.0	54	432	194.0	0.44
1.5	58	509	136.0	0.27
Variable (0.7 – 1.4)	30	215	73.4	0.34
TOTAL	176			

Los resultados finales del estudio realizado por López y Silva³³ sirvieron de apoyo para que la Asociación de Ingeniería Sísmica desarrollara un manual de construcción sismo resistente de viviendas en bahareque encementado³⁴. Dicho manual presenta requisitos adicionales, para el Título E de las Normas Colombianas de Construcción Sismorresistente NSR-98, en relación con el diseño simplificado y construcción de casas de uno y dos pisos de bahareque encementado de madera y guadua (Capítulo E.7- Decreto 52 de 2002) que facilita la aplicación de requisitos mínimos en el caso de viviendas individuales. En dicho capítulo se especifican algunas propiedades físicas y se colocan en consideración requisitos como el contenido de humedad y el proceso de

³¹ LÓPEZ, Luis Felipe y SILVA, Mario Felipe. Comportamiento sismorresistente de estructuras en Bahareque. Manizales, 2000. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería.

³² GÓMEZ, Carlos y RUBIO, Fabio. Esfuerzos de trabajo para elementos estructurales en guadua (Bambusa Guadua). Bogotá 1990. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

³³ LÓPEZ, Op Cit.

³⁴ AIS ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. Manual de Construcción Sismo Resistente de Viviendas en Bahareque Encementado. 2001. Publicación con el auspicio de la Fundación Corona.

inmunización que se debe llevar a cabo, para que la guadua cumpla con determinadas condiciones que garanticen su adecuado comportamiento como material de construcción.

Este gran paso, que la guadua sea ya reconocida como material de construcción en bahareque encementado en las Normas NSR-98, anima y estimula sin lugar a dudas a los actuales estudios e investigaciones que se adelantan en diferentes Universidades y Centros de Investigación del país para continuar, pues se afianza la esperanza de que dichos estudios en un futuro no muy lejano, sean la base de nuevos capítulos y adiciones a nuestra norma sismorresistente, en cuanto a lo referente a un material tan autóctono y tan útil como lo es la guadua.

A nivel mundial se ha empleado la guadua en la construcción de diversas estructuras³⁵ que dan solución a las principales necesidades habitacionales, ingenieriles y arquitectónicas.

³⁵ Fotos No. 83, 84, 85 y 86 del Anexo B

7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

7.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Según se ha estudiado, la guadua es un material cuyas propiedades mecánicas dependen de la especie botánica, la edad de corte, la sección del culmo que se utilice y de las propiedades físicas.

Los parámetros tenidos en cuenta fueron: Contenido de humedad, densidad seca al aire y densidad básica.

7.1.1. Contenido De Humedad (CH)

Una característica de la guadua, es que contiene una gran cantidad de agua, distribuida tanto en las cavidades celulares, como en la parte constitutiva de las células. La primera se denomina "agua libre" y la segunda "agua fija"³⁶.

En las especies leñosas es un factor muy importante por la manera como ésta afecta las propiedades mecánicas.

El contenido de humedad es la cantidad de agua en una porción del material, y se determina según las recomendaciones del "Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo" realizadas por el INBAR. (International Network of Bamboo and Rattan)³⁷, mediante la siguiente fórmula:

$$CH(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Donde:

³⁶ LASTRA, J.A. Generalidades sobre Tecnología de Maderas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes. Dpto. de Construcción. Bogota.

³⁷ Ver Anexo C

P_h : Peso de la muestra antes de secar

P_s : Peso de la muestra después de secar

7.1.2. Densidad Básica (DB)

Se define como la relación entre el peso seco al horno y el volumen verde de la muestra, para el cual se sigue el procedimiento del "Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo"³⁸, el cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$DB = \frac{P_{sh}}{V_v}$$

Donde:

DB : Densidad básica, en gr/cm³

P_{sh} : Peso seco al horno, en gr

V_v : Volumen verde, en cm³

7.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

7.2.1. Elasticidad

Es la propiedad de cuerpos sólidos de deformarse bajo la acción de una fuerza y regresar a la forma original, cuando aquella deja de aplicarse. Este comportamiento se mantiene hasta cierto límite, por encima del cual la deformación total no es recuperable, es decir, se produce una deformación permanente en la muestra. Si continua aplicándose una carga creciente se llega a la falla de la muestra.³⁹

Para realizar el análisis de los esfuerzos internos en un cuerpo sólido, se requiere un corte imaginario en la sección mn (Fig. 10.a), que sea perpendicular al eje longitudinal del sólido separando la parte del sólido a la derecha del corte como un cuerpo libre (Fig. 10.b).

³⁸ Ver Anexo C

³⁹ SEELY, F.B. Resistencia de materiales. Editorial Hispanoamericana. México. 1954.

La carga de tensión P actúa sobre el extremo derecho del cuerpo libre; en tanto en el otro extremo resultan fuerzas que representan la acción de la parte izquierda del sólido sobre la parte separada.

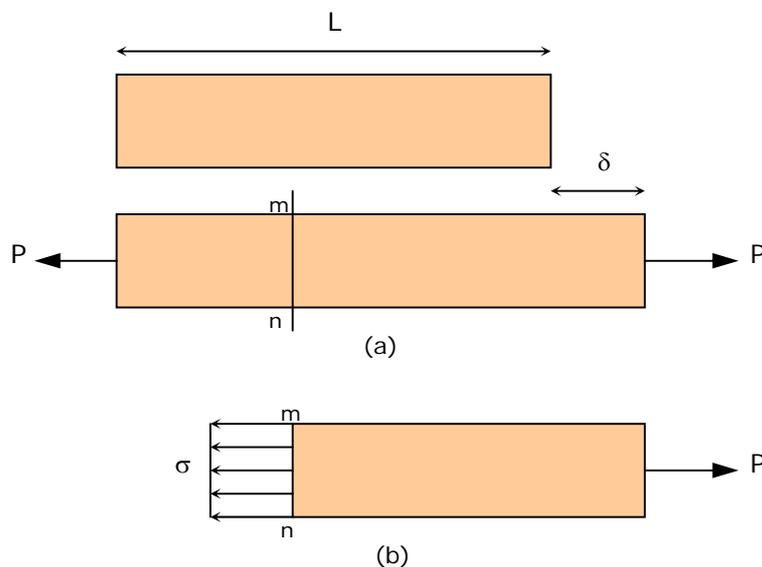


Figura 10. Elemento prismático sujeto a tensión.

Se asume que la fuerza se distribuye uniformemente sobre el área de la sección transversal; a esta fuerza por unidad de área se le denomina esfuerzo (σ), esto se cumple siempre y cuando la fuerza axial P actúa en el centroide del área de la sección transversal.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Al estar el cuerpo sólido sometido a una carga axial, éste va a sufrir cambios en su longitud, lo que se denomina deformación (δ), la cual al dividirla por la longitud total del sólido, se obtiene la deformación unitaria (ϵ).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Los diagramas de esfuerzo-deformación son característicos para cada material y proporciona información importante acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento típico del material (Fig. 11).

Normalmente para los materiales estructurales existe una región inicial en donde el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales y se dice que el comportamiento del material es lineal; adicionalmente, si el material que ha sido cargado, se le retira lentamente la carga, y si el material sigue exactamente la misma curva al regresar al punto inicial de deformación, recuperando así sus dimensiones iniciales, se dice que es un material elástico.

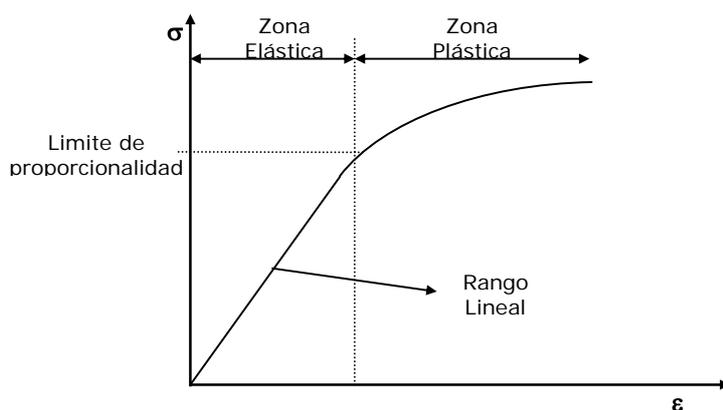


Figura 11. Diagrama esfuerzo-deformación.

Para un material linealmente elástico, la relación entre los esfuerzos y la deformación se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde E es una constante de proporcionalidad conocida como el módulo de elasticidad del material. El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación en la región linealmente elástica y su valor depende del material particular que se utilice.

Para determinar el módulo de elasticidad de la guadua, se sigue el procedimiento del "Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo" realizadas por el INBAR⁴⁰.

⁴⁰ Ver Anexo C

7.2.2. Teoría De Pandeo De Columnas

La evaluación de la resistencia de las columnas se basa en la teoría de la carga crítica establecida en un principio por Euler⁴¹ hace más de 250 años, teoría que permite predecir con buena aproximación el comportamiento de columnas largas, pero que para las de longitud intermedia suele sobreestimar la capacidad.

La falla de una columna incluye el fenómeno de inestabilidad conocido como pandeo, por cuyo resultado el elemento experimenta deflexiones de un carácter totalmente diferente al de aquellos que están asociados con la carga inicial.

Se considera una columna esbelta con extremos articulados, totalmente recta y de un material linealmente elástico, es decir, una columna ideal, que está cargada por una fuerza vertical P que se aplica en el centroide de la sección transversal y que está alineada en el eje longitudinal de la columna.

Cuando la carga axial P es pequeña, la columna permanece recta y solo experimenta compresión axial. Hasta este punto se considera que la columna está en un equilibrio estable, lo cual indica que una vez retirada la carga, la columna regresará a su posición original.

Al incrementarse la carga P, se llega a una situación de equilibrio neutro en la que la columna puede adoptar una forma flexionada. La carga en este punto corresponde a la carga crítica P_{cr} . Para esta carga la columna ideal puede sufrir pequeñas deflexiones laterales sin ningún cambio en la fuerza axial, y una pequeña carga lateral producirá una forma flexionada que no desaparece cuando se retire la carga lateral.

Luego, la carga crítica mantiene a la columna en equilibrio estático, ya sea en la posición recta o levemente flexionada. Cuando la carga es mayor a la crítica, la columna es inestable y fallará por flexión. Para una columna ideal la carga crítica está determinada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

⁴¹ Leonhard Euler (1707-1783). Matemático Suizo, fue el primero que estudio la flexión de una columna esbelta y determinó su carga crítica (en 1744)

En la realidad, las columnas no son ideales, y menos aún para un material como la guadua que tiene varios factores que afectan su resistencia, como imperfecciones de la sección, heterogeneidad del material, rectitud del elemento de columna y la aplicación de la carga en el centroide de la sección.

Las condiciones de apoyo son las más importantes a menudo para determinar la carga crítica de una columna, debido a las diferencias que se presentan en cada caso en la práctica, por lo cual se consideró en la fórmula de Euler el valor de L_e como la longitud efectiva de la columna, que representa la longitud entre puntos de inflexión en la geometría de la deformada de la columna. Entonces la ecuación de carga crítica será:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2}$$

Donde k es un factor de longitud efectiva que depende de las condiciones de los apoyos.

Una forma cuantitativa de establecer los límites entre cada tipo de columnas, está basado en el valor de los esfuerzos permisibles con respecto a la relación de esbeltez (λ). La relación de esbeltez está definida como el cociente entre la longitud de la columna y el radio de giro mínimo de la sección transversal:

$$\lambda = \frac{L}{r}$$

Donde el radio de giro se define como:

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

Con lo cual se obtiene la carga crítica en función de la relación de esbeltez, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \quad (7.1)$$

El comportamiento de una columna de madera se puede representar mediante un diagrama de esfuerzo de compresión contra la relación de esbeltez (λ) (Fig. 12), en

donde la curva de Euler solo predice el comportamiento en columnas cuyos esfuerzos están por debajo del límite de proporcionalidad del material (σ_{ip}), por encima de estos esfuerzos el comportamiento se vuelve inelástico y difiere de la ecuación de Euler. En el punto donde se llega al límite de proporcionalidad se le asigna la relación de esbeltez crítica (λ_c), como se muestra a continuación:

$$\lambda_c = \left(\frac{L_e}{r} \right)_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{ip}}}$$

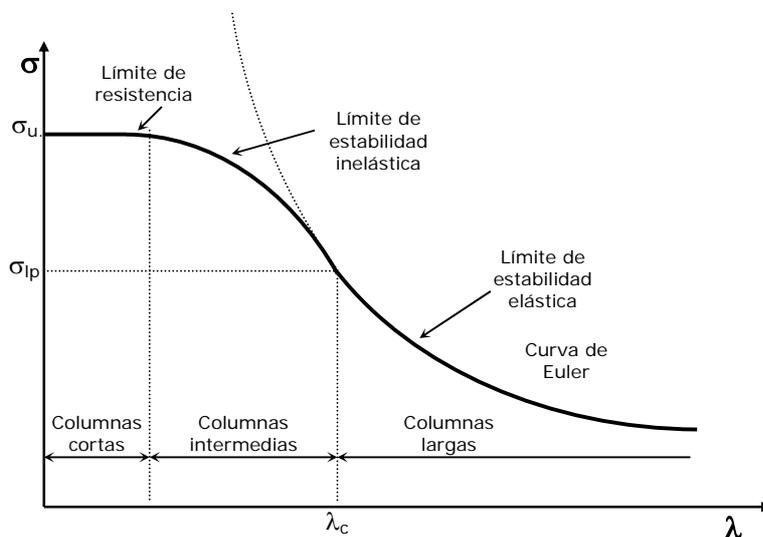


Figura 12. Diagrama esfuerzo de compresión contra relación de esbeltez.

Para columnas cuya relación de esbeltez (λ) es menor que λ_c , el esfuerzo de la columna excede el límite de proporcionalidad antes de que ocurra pandeo, por lo cual se requiere de una teoría de pandeo inelástico para el cálculo de cargas críticas.

Una de las teorías se fundamenta en que para un punto una vez sobrepasado el límite elástico en un diagrama esfuerzo-deformación, la relación entre la deformación unitaria y el esfuerzo está dada por la pendiente de la curva en ese punto, y se le da el nombre de módulo tangencial (E_t).

El módulo tangencial (E_t) es una propiedad variable del material que disminuye a medida que se incrementan los esfuerzos por encima del límite de proporcionalidad.

En la teoría del módulo tangencial de pandeo inelástico⁴², las consideraciones del comportamiento de la columna ideal son iguales a las de pandeo elástico, reemplazando el módulo de elasticidad (E), por el módulo tangencial (E_t). Por lo tanto la ecuación para carga del módulo tangencial:

$$P_t = \frac{\pi^2 E_t I}{L^2}$$

El esfuerzo crítico correspondiente es:

$$\sigma_t = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

Para determinar el módulo tangencial (E_t) es necesario graficar el comportamiento de una columna intermedia ideal mediante una curva esfuerzo-deformación, que incluya el comportamiento inelástico lo cual requiere de ensayos de laboratorio automatizados.

En el Manual de Diseño de Maderas para el Grupo Andino⁴³ se utiliza una ecuación experimental propuesta por el National Forest Products Laboratory de Madison, Wiconsin, EE.UU. para columnas intermedias que fallan por una combinación entre aplastamiento y pandeo. Esta ecuación ha sido desarrollada teniendo en cuenta columnas de madera de esbeltez intermedia.

$$\frac{P}{A} = \sigma_u \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^4 \right] \quad (7.2)$$

El valor de λ_0 es la abscisa del punto de tangencia entre la gráfica de la ecuación para columnas intermedias y cortas (7.2) y la ecuación de Euler (7.1), es decir, donde las derivadas con respecto a λ son iguales.

Derivando la ecuación (7.2) se tiene entonces:

$$\frac{\partial(P/A)}{\partial(\lambda)} = -\frac{4}{3} \sigma_u \frac{\lambda^3}{\lambda_c^4} \quad (7.3)$$

⁴² Formulada en 1889, por el Alemán Engesser

⁴³ MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS PARA EL GRUPO ANDINO. Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima – Perú, 1984.

Derivando ahora la ecuación de Euler (7.1):

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Se obtiene:

$$\frac{\partial(P/A)}{\partial(\lambda)} = -\frac{2\pi^2 E}{\lambda^3} \quad (7.4)$$

Igualando la ecuación (7.3) con (7.4):

$$-\frac{4}{3} \sigma_u \frac{\lambda^3}{\lambda_c^4} = -\frac{2\pi^2 E}{\lambda^3} \quad (7.5)$$

Teniendo en cuenta que el valor del esfuerzo (σ_u) es el mismo en el punto de tangencia de las dos curvas y que la relación de esbeltez (λ) en ese mismo punto es la relación de esbeltez crítica (λ_c):

$$\lambda = \lambda_c$$

Se reemplaza en la ecuación (7.5):

$$\frac{4}{3} \sigma_u \lambda_c^2 = 2\pi^2 E$$

Despejando el valor de λ_c :

$$\lambda_c^2 = \frac{3 \pi^2 E}{2 \sigma_u}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{(2/3) \sigma_u}}$$

Lo que corresponde al valor de la relación de esbeltez, donde las curvas son tangentes, es decir, el límite entre las columnas cortas y las largas.

El valor del esfuerzo admisible en este punto es:

$$\sigma = \frac{2}{3} \sigma_u$$

Lo que indica que el esfuerzo en el límite proporcional, corresponde al 67% del esfuerzo máximo a compresión.

8. METODOLOGÍA DE TRABAJO

8.1. MATERIAL UTILIZADO

Para la realización de esta investigación, se tuvo en cuenta que la guadua Macana es la más utilizada en el eje cafetero y en las construcciones realizadas, ya que presenta características y propiedades mas adecuadas desde el punto de vista estructural. Por lo cual se buscó que la edad de la guadua extraída estuviera entre los tres y cinco años de edad, que es cuando la guadua presenta su mayor resistencia.

La guadua macana se presume es la más resistente de todas, pues su tejido esclerénquima (el más denso), conforma la mayor parte de la sección. Es fácilmente confundible con la guadua cebolla, ya que presentan diámetros similares, que varían entre 70 y 150 mm, y espesores de 12 mm aproximadamente. Esta guadua se da en lugares con condiciones adversas: pronunciadas pendientes, pocos nutrientes, baja humedad. Algunas características notables según González y Díaz son:

- Presenta coloración blanca debido al recubrimiento de un tejido blanquecino, reticulado y de tipo arenoso, esparcido a lo largo del entrenudo y más concentrado a nivel del nudo; los nudos son rectos.
- Acanaladura visible y prolongada hasta más allá de la mitad del entrenudo⁴⁴



Foto No. 22. Guadua macana

La guadua empleada, es originaria del departamento del Quindío, ya que la guadua de esa zona del país presenta una mejor calidad por sus condiciones climatológicas y por su suelo y el territorio donde la variedad Macana se da en mayor abundancia. La

⁴⁴GONZALEZ, Eugenia y DÍAZ, John. Propiedades físicas y mecánicas de la guadua. Universidad Nacional Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1992. p.4

guadua que se utilizó fue extraída de la Hacienda “Las Palmas”, ubicada en cercanías del municipio de Calarcá⁴⁵, Quindío.

El corte de la guadua se efectuó según las tradiciones y recomendaciones de los campesinos oriundos del eje cafetero y se realizó el corte de los tallos a ras sobre el primer o segundo nudo localizado por encima del suelo. Una vez cortados los tallos se aplica el procedimiento de curado dentro del mismo guadual (curado en la mata), por un tiempo entre dos a tres semanas, para luego ser transportados. Los tallos embarcados fueron cortados en tramos de 4 metros para facilitar el transporte hasta Bogotá, donde fueron almacenadas en los patios del Instituto de Ensayos e Investigaciones (IEI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, cuidándolas de la intemperie⁴⁶.

8.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

En total se cortaron 80 probetas distribuidas de las siguiente manera⁴⁷:

- **Probetas Tipo A.** Estas fueron cortadas de longitudes entre 0.80 y 3.00 metros, teniendo en cuenta que el tramo fuera recto y que no se presentaran grandes imperfecciones. En total se obtuvieron 35 probetas con el fin de determinar el comportamiento individual de las columnas de guadua.
- **Probetas Tipo E.** Estas probetas fueron cortadas con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad y resistencia máxima a compresión de la guadua con la que se realizaron las investigaciones. La altura de estas probetas era igual a su diámetro, con base en las recomendaciones hechas para el ensayo de compresión según el “Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo” de la INBAR.
- **Probetas Tipo B.** Son probetas de 3.00 metros de longitud, que fueron seleccionadas para ser ensayadas en paquetes de tres guadas, con los

⁴⁵ En este municipio se presentan condiciones óptimas para el crecimiento de la guadua, ya que se encuentra a 1356 msnm y presenta una temperatura promedio de 20 °C.

⁴⁶ Ver Anexo B

⁴⁷ Ver Anexo B

diferentes tipos de uniones. En total se cortaron 27 guaduas, 9 para cada tipo de unión. Se verificó que estas fueran rectas en toda su longitud y que no presentaran imperfecciones.

En el corte de todas las probetas se trató de lograr un perfecto paralelismo entre las dos bases de la probeta teniéndose cuidado de que fueran perpendiculares a su eje longitudinal.

Para todas las probetas se tomaron los siguientes datos:

- **Altura:** Para las probetas tipo A y B, se tomaron las medidas con un flexómetro, el cual arroja un margen de error de 0.1 cm. Para las probetas tipo E, se realizaron tres medidas y se utilizó un calibrador “pie de rey” marca Stainless que da una aproximación en la lectura de 0.01 cm.
- **Diámetro Interno:** Se tomaron dos medidas a 180° de una con respecto a la otra y en ambos extremos de la probeta. Esto se realizó para las probetas Tipo A y B.
- **Diámetro Externo:** Para las probetas tipo E, se tomaron tres lecturas, cada una a 120°. También se midieron en ambas bases con un calibrador “pie de rey” marca Stainless.
- **Espesor de la Pared:** Este dato se obtuvo midiendo en ambas bases con un calibrador “pie de rey” marca Stainless. Para las probetas tipo A y B, se tomaron 2 medidas y para las probetas tipo E, se tomaron tres medidas.

8.3. MÁQUINAS Y EQUIPOS UTILIZADOS

La epidermis de la guadua, se caracteriza por su dureza debido a la gran cantidad de sílice que contiene; además, está cubierta por una capa cerosa que la impermeabiliza, así que para realizar los cortes se requiere de una herramienta de filo fino y apropiado. Para realizar los cortes de todas las probetas se utilizó una Acolilladora marca PRO-TECH, con la cual se realizaron los diferentes cortes en la guadua⁴⁸.

⁴⁸ ver Anexo B

Para poder realizar los ensayos, fue necesario disponer de dos máquinas del Laboratorio de Metalurgia del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional⁴⁹. Sus principales características son:

- **Máquina de ensayos marca AMSLER de la casa SCHAFFHOUSE-SUISSE**

Con un recorrido máximo del cabezal móvil de 75 cm. Capacidad máxima de carga de 30 Toneladas, con escalas adicionales de 10 y 20 toneladas. En esta máquina se realizaron los ensayos para determinar el módulo de elasticidad, utilizando una escala de 20 toneladas, con una aproximación en las lecturas de 100 Kgf, la velocidad del ensayo fue de 0.05 pulg/min, que es la mínima disponible. El sistema de transmisión de potencia es hidráulico.

- **Máquina de ensayos marca TINIUS OLSEN**

Su máximo recorrido es de 5 metros. Capacidad de carga máxima de 200 toneladas y con una aproximación en las lecturas de 50 Kgf. La velocidad de aplicación de la carga fue de 0.05 pulg/min. El sistema de transmisión de potencia es electro-mecánico. Se utilizó para el ensayo de probetas tipo A y B.

8.4. DETERMINACIÓN DE MODELOS DE ENSAYOS

8.4.1. Ensayo De Humedad

El ensayo para determinar el contenido de humedad de la guadua, se realizó una vez se terminaban los ensayos con las diferentes probetas, de las cuales se extrajo una muestra de una parte cercana a la falla⁵⁰. La muestra correspondiente fue pesada para obtener el peso húmedo, empleando una balanza digital que arroja un error de 0.01 gramos, posteriormente llevada al horno y sometida a una temperatura de 110° C, en donde se dejaba hasta que se lograra que el peso de la muestra fuera constante, lo que se denomina peso seco.

⁴⁹ Ver Anexo B

⁵⁰ Ver Anexo B

El procedimiento se siguió según las recomendaciones del “Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo” realizadas por el INBAR.

8.4.2. Ensayo De Densidad Básica

Para determinar la densidad básica se siguió el procedimiento dado en el “Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo” del INBAR., las cuales se basan en el principio de inmersión (Arquímedes). Para obtener el volumen verde de la guadua, se saturaron las muestras para así llevarlas a la condición de volumen verde donde posteriormente se obtuvo el peso sumergido, y luego se secaron al horno a una temperatura de 110° C, hasta obtener el peso seco de la muestra.

8.4.3. Ensayo De Probetas Cortas

Para determinar el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo de la guadua, se realizó el ensayo de compresión paralela a la fibra, siguiendo el procedimiento del “Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo” del INBAR. Las probetas utilizadas fueron las tipo E, las cuales fueron ensayadas en la máquina de ensayos marca AMSLER de la casa SCHAFFHOUSE-SUISSE, con una velocidad en el ensayo de 0.05 pulg/min.

Para realizar los ensayos se utilizaron deformímetros mecánicos marca Starrett, los cuales tienen una precisión de 0.01 mm. Estos se utilizaron con el fin de medir la deformación de las probetas. Como apoyos fueron utilizados una platina en el extremo superior y una rótula en el extremo inferior, con el fin de garantizar la distribución de la carga sobre toda el área de la sección transversal.



Foto No. 23. Ensayo de compresión paralela a la fibra.

8.4.4. Ensayo De Columnas Individuales

Estos ensayos se realizaron en la máquina de ensayos marca TINIUS OLSEN, con una velocidad de carga de 0.05 pulg/min. Se ensayaron las probetas tipo A, para las cuales se tomaron datos de carga máxima.

Para lograr que las columnas se comportaran como simplemente apoyadas, se colocó en el extremo superior una platina y en el extremo inferior una rótula que permite que la columna gire cuando esta empieza a pandearse.



Foto No. 24. Detalle de apoyo con rótula para ensayo de probetas tipo A

8.4.5. Ensayo De Columnas Armadas Con Tres Guaduas

La realización de estas pruebas se hizo en la máquina de ensayos marca TINIUS OLSEN, aplicando carga con una velocidad de 0.05 pulg/min. De estas columnas se tomaron datos de carga máxima.

Debido a que el área de la sección transversal es mas grande, había que garantizar que la distribución de las cargas fuera uniforme sobre toda el área, para lo cual se dispuso en el extremo superior de una platina de acero con una lámina de neopreno de una pulgada de espesor y en el extremo inferior se colocó una lámina de neopreno de 2 pulgadas de espesor⁵¹.

⁵¹ Ver Fotos No. 79 y 80 en el anexo B

9. DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DE UNIONES

Las uniones a diseñar consisten en fabricar con tres elementos individuales de guadua de tres metros de longitud, un único elemento de sección transversal compuesta.

Cada una de las guaduas que forman la unión se requiere que cumplan las siguientes características:

- Guaduas que sean cepas ó basas.
- Diámetros exteriores entre los 8 cm y 10 cm
- Longitud de 3.0 m procurando que el eje longitudinal sea lo mas recto posible.
- Distancia de los entrenudos entre 20 cm y 30 cm



Foto No. 25. Guaduas aptas para la realización de las probetas

El objetivo principal del diseño de las uniones, es lograr obtener unas uniones que garanticen el trabajo de tres guaduas independientes como un solo elemento, al formar una sección transversal compuesta "triangular", que aseguren un trabajo en conjunto, permitiendo estudiar su comportamiento como elementos de columnas.

Este tipo de unión transversal provoca modificaciones en algunas propiedades físicas del nuevo elemento, como son el radio de giro, su relación de esbeltez e inercia.

Dentro de los objetivos también se encuentra el proponer uniones que utilicen tecnologías simples y económicas, así como materiales de fácil acceso, manejabilidad y trabajabilidad.

Adicionalmente es un requisito importante, garantizar que las uniones no lleguen a fallar previamente a las guaduas que constituyen el elemento y que en todo momento del ensayo, se mantengan los arriostramientos instalados, para garantizar que la columna trabaje como un solo elemento formado por tres guaduas y no como tres elementos individuales. Adicionalmente la disposición de la unión central genera una

disminución de la longitud de pandeo de cada una de las guaduas individuales, variando así mismo la relación de esbeltez.

9.1. TIPOS DE UNIONES PROPUESTAS

Los tres tipos de uniones propuestas, fueron pensadas, considerando la facilidad de su fabricación así como las costumbres y tradiciones de los campesinos que se ven reflejadas en algunas construcciones autóctonas que emplean manilas o cabuyas para realizar los amarres de los diferentes elementos estructurales que utilizan para edificar sus viviendas.

En las uniones tipo uno y tipo tres se emplea cuerda de polipropileno, con el objetivo de seguir la tradición anteriormente nombrada; no se emplearon manilas ni cabuyas, debido a que la durabilidad de estas ante condiciones de intemperie como la humedad, el aire, etc, es muy reducida, produciendo pudrición en las cabuyas, lo que le resta resistencia a la unión a través del tiempo, por esta razón, se eligió una cuerda de polipropileno que presenta mejores condiciones ante este tipo de desgaste.

En la unión tipo dos, se deja de lado el empleo de las cuerdas y se entra a la utilización de materiales más resistentes y durables que a pesar de tener un peso más alto, puede representar economía en cuanto a resistencia y durabilidad.

Los tres tipos de uniones propuestas son:

1. UNIÓN TIPO UNO: unión de tres guaduas tangencialmente en toda su longitud, con amarre en cuerda de polipropileno de 3/16".
2. UNIÓN TIPO DOS : unión de tres guaduas tangencialmente en toda su longitud, con amarre en alambre de acero galvanizado de 1/8".
3. UNIÓN TIPO TRES: unión de tres guaduas separadas en toda su longitud empleando bambúes, con amarre en cuerda de polipropileno de 3/16".

Cada una de las uniones propuestas se realizó en cada uno de los extremos y en el centro de su longitud de cada una de las probetas a diseñar a manera de arriostamiento. En total se fabricaron 3 probetas por cada tipo de unión, para un total de 9 columnas.

9.2. DESCRIPCIÓN Y MATERIALES EMPLEADOS EN CADA UNIÓN

9.2.1. Unión Tipo Uno

UNIÓN DE TRES GUADUAS TANGENCIALMENTE EN TODA SU LONGITUD CON AMARRE EN CUERDA DE POLIPROPILENO DE ϕ 3/16".

Este tipo de unión consiste en amarrar tres guaduas de la misma longitud, en cada uno de sus extremos y en el centro de su longitud; empleando un amarre de varias vueltas en cuerda de polipropileno de 3/16" de diámetro, el cual se ajusta realizando un nudo final que garantice en el momento del ensayo, el pretensionamiento que se le da a la cuerda durante la elaboración de la unión, de tal forma que ésta permanezca cumpliendo su función.



Foto No. 26. Unión tipo uno en un extremo de una probeta

9.2.1.1. *Materiales Para La Fabricación De La Unión*

9.2.1.1.1. **Cuerda De Polipropileno Flotante De Ajuste Fácil De 3/16"**



Foto No. 27. Sección transversal de la unión tipo uno

Esta cuerda empleada, se seleccionó por sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales se describirán a continuación, según los parámetros del fabricante.

La cuerda de Polipropileno Flotante de ajuste fácil de 3/16", es fabricada por la empresa ZUBI-OLA.

Es importante decir que una cuerda es un conjunto flexible de fibras o alambres enrollados o trenzados juntos para conseguir resistencia a la tracción. Las cuerdas pueden fabricarse con fibras naturales, como el algodón, cáñamo, yute, lino o sisal; con filamentos sintéticos, como el nylon, el polipropileno, el poliéster o la fibra de vidrio, y con alambre metálico.



Foto No. 28. Rollo de cuerda de polipropileno

La cuerda utilizada en las uniones es de polipropileno, este material sintético, es dos veces más fuerte que la manila. Resistente al aceite, la gasolina y a la mayoría de los productos químicos. No se pudre y no lo afectan ni el moho ni el agua. Flota y resiste bien a la abrasión. Las características anteriores hacen que esta cuerda sea apropiada para usarla como material de amarre de un elemento de columna que debe resistir cargas de servicio considerables y condiciones ambientales extremas. A pesar de las características dadas por el fabricante, se recomienda realizar un mantenimiento a la cuerda, así como protegerla desde su colocación con recubrimientos como lacas o pinturas especiales para este tipo de material.

Los fabricantes exponen una Información general acerca de las cuerdas y las recomendaciones que se deben tener en cuenta al utilizarlas.

- **Propiedades de la cuerda**

El fabricante propone un cuadro comparativo entre diferentes tipos de cuerdas, señalando algunas de las propiedades físicas y mecánicas que debe presentar una cuerda para garantizar su excelente trabajo:



Foto No. 29. Cuerda de polipropileno de 3/16" marca ZUBI-OLA

Tabla No. 5.
Propiedades de diferentes tipos de cuerdas

PROPIEDAD O CARACTERÍSTICA	TIPO DE CUERDAS					
	NYLON	POLY	POLYESTER	MANILA	PITA	ALGODON
CARGA DE IMPACTO	TTTT	TTT	TT	TT	T	T
RESISTENCIA PODRIMIENTO	TTTT	TTTT	TTTT	T	T	T
RESISTENCIA AL MOHO	TTTT	TTTT	TTTT	T	T	T
RESISTENCIA AL SOL	T	T	TTTT	TTTT	TTTT	TTTT
MANEJO	TTTT	TTT	TTTT	TT	T	TTTT
CALOR	DEBIL A 350°	DEBIL A 350°	DEBIL A 350°	NO AFECTA	NO AFECTA	NO AFECTA
ALMACENAJE	PUEDE SER HUMEDO	PUEDE SER HUMEDO	PUEDE SER HUMEDO	DEBE SER EN SECO	DEBE SER EN SECO	DEBE SER EN SECO
ACEITE Y GAS	TTTT	TTTT	TTTT	TT	TT	TT
RESISTENCIA A LOS ACIDOS	TTT	TTTT	TTTT	T	T	T
ABRASIÓN	TTTT	TT	TTTT	TTT	TT	TT
DURABILIDAD	TTTT	TTT	TTTT	TTT	T	TT
FLOTANTE	NO	SI	NO	NO	NO	NO

- **Cargas admisibles ante esfuerzos de tensión.**

Las cargas admisibles varían de acuerdo con la utilización de la cuerda, su estado, los diversos factores que afectan su comportamiento, y el grado de riesgo para el cual se utiliza. Los fabricantes han tabulado las cargas admisibles correspondientes a una cuerda en buenas condiciones que tiene los ajustes adecuados y que no se empleará en situaciones críticas sino en condiciones normales de servicio.

A continuación se presenta la tabla propuesta por los fabricantes, donde se hace una comparación entre los diferentes tipos de cuerdas y sus diámetros efectivos.

Tabla No. 6.
Cargas admisibles a tensión (Kgf) para diferentes tipos de cuerdas.

MEDIDA	TIPO DE CUERDA							
	TORCIDO NYLON	TRENZADO NAYLON	TORCIDO POLY	TRENZADO POLY	TRENZADO POLYESTER	TORCIDO MANILA	TORCIDO ALGODÓN	TRENZADO ALGODÓN
1/8" (#4)	-	40	-	-	-	-	-	-
5/32" (#5)	-	45	-	26	-	-	-	-
3/16" (#6)	75	75	72	65	90	41	33	-
¼" (#8)	124	124	113	110	149	54	44	-
5/16" (#10)	192	192	171	154	230	90	72	-
3/8" (#12)	278	278	244	215	334	122	96	-

Para realizar el diseño de las uniones, además de tener en consideración las cargas admisibles suministradas por el fabricante, se realizaron pruebas de resistencia a la tensión en el laboratorio (ensayos preliminares) de algunos tramos de cuerda de polipropileno, con el objetivo de corroborar la información suministrada y obtener mayores datos de referencia para la elaboración del diseño de la unión. Los resultados de dichas ensayos preliminares se muestran a continuación:

- **Ensayos Preliminares**

La cuerda bajo condiciones normales, fue sometida a ensayos de tensión, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla No. 7.
Resistencia a tensión de cuerda de polipropileno de 3/16".

ENSAYO #	RESISTENCIA A TENSIÓN (Kgf)
1	360
2	320
3	340
4	370
Promedio	347.5

El promedio obtenido de la resistencia a la tensión fue de 347.5 Kgf. Según The Cordage Institute de Washington, D.C, que establece las normas para la utilización de cuerdas en la industria, para una cuerda de polipropileno de 3/16", la carga admisible es de 72 Kgf.

También se realizaron pruebas con la cuerda de polipropileno luego de estar sumergida durante 15 días en agua, para verificar que conserve sus propiedades en condiciones extremas. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla No. 8.
Resistencia a tensión de cuerda de polipropileno de 3/16", sumergida en agua.

ENSAYO #	RESISTENCIA A TENSIÓN (Kgf)
1	330
2	310
Promedio	320



Foto No. 30. *Ensayo a tensión de cuerda de polipropileno.*

Los resultados conseguidos, verifican que la cuerda efectivamente está cumpliendo con los requisitos mínimos de resistencia, aún en condiciones adversas.

- **Nudo Utilizado**

Parte fundamental de la unión tipo uno y tres es el nudo terminal con el que se ajustan los dos extremos de la cuerda y se garantiza la tensión dada por el número total de vueltas, la selección de este nudo es muy importante, ya que determinará que las cuerdas mantengan la tensión impuesta.

Las técnicas de anudar, se encuentran entre las más antiguas. Existen miles de nudos diferentes, gran parte de ellos destinados a propósitos específicos, como montar una tienda de camping (campaña), atar caballos, preparar aparejos de pesca o hacer nudos corredizos o lazos.

Como se mencionó anteriormente el éxito de la unión no sólo se encuentra en el tipo de cuerda que se emplee también es muy importante el nudo o ajuste que se efectúe, pues será éste el encargado de mantener la cuerdas unidas y con el tensionamiento

requerido para que las guaduas permanezcan unidas y que realmente funcione la unión. El nudo empleado fue uno sugerido por los fabricantes, el cual denominan: NUDO PARA ANUDAR DOS CUERDAS, que a continuación se describe paso a paso:

1. Se tienen sujetos en las manos los dos extremos libres de la cuerda, es decir el extremo inicial del amarre y el final.

2. Se realiza un bucle o arandela con uno de los extremos, empleando aproximadamente 30 cm de cuerda.

3. El otro extremo (del cual se debe prever una longitud efectiva para efectuar el nudo de 30 cm aproximadamente), se introduce dentro del bucle en dirección de abajo hacia arriba, es decir que la cuerda del bucle quede por encima de la que anuda. Este extremo se empieza a dar vueltas rodeando el bucle, siempre haciendo que la cuerda que anuda quede por encima del bucle. Esta vuelta se realiza 3 veces.

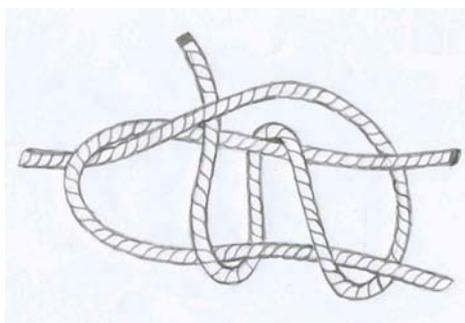


Figura No. 13. Esquema del nudo utilizado en la unión tipo uno.

4. Finalmente el extremo que anuda debe quedar en el lado opuesto del bucle, el nudo se termina entonces al halar ambos extremos a amarrar y tensionar con fuerza para apretar el nudo.

- **Determinación Del Número De Vueltas**

La unión como tal para que realmente funcione, requiere determinado número de vueltas alrededor de las guaduas que se necesitan unir, este número de vueltas tiene en cuenta dos parámetros.

El primero es el esfuerzo admisible de tensión que es capaz de soportar la cuerda de polipropileno y el segundo es la fuerza lateral producida al pandearse una columna individual de guadua.

Esta fuerza lateral se considera que se encuentra entre el 5% y el 10% de la carga soportada por la columna, para el estudio se supone que la fuerza lateral es del 10%,

por ser el estado mas crítico. En el capítulo 10 se muestra el cálculo del número de vueltas necesarios para realizar la unión.

- **Procedimiento de armado**

Se seleccionan las tres guaduas de tal forma que presenten características similares de diámetro y separación entre nudos.

La determinación del lugar donde se va arriostrar la columna en el centro de la misma, se hace una vez que se encuentran alineadas las tres guaduas con respecto a un nivel horizontal en uno de los extremos, se debe procurar que en el punto donde se va a colocar una unión coincidan los nudos intermedios de cada una de las tres guaduas, esto con el objeto de evitar la deformación (hundimiento) de los entrenudos.



Foto No. 31. Unión tipo uno en el centro de la longitud de la probeta

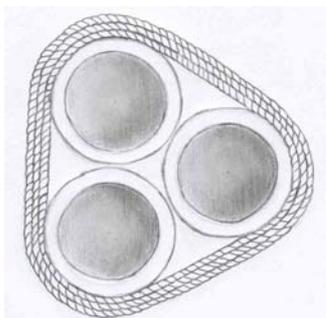


Figura No. 14. Esquema de la sección transversal de la unión tipo uno.

Para facilitar la construcción de las uniones, se disponen las guaduas de manera horizontal, de acuerdo con la sección que se desea dar (Figuras No. 14 y 15), se marcará exactamente los nudos sobre los cuales se efectuará la unión y se procede a dar las vueltas requeridas, con el cuidado de ir proporcionando la tensión necesaria para que la cuerda ajuste y cumpla su función.

La organización de la disposición del número de vueltas que se deben dar con las cuerdas en la unión, se realiza en un total de tres hileras, en la primera de las hileras se disponen 15 vueltas, en la segunda 13 vueltas y en la tercera y ultima 12, esta disposición es para evitar que la longitud de la unión se prolongue a los entrenudos, lo cual provocaría la deformación de los mismos.

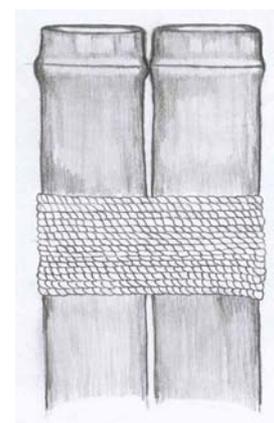


Figura No. 15. Esquema de la unión tipo uno.

Al iniciar la primera vuelta, se debe tener la precaución de no olvidar dejar aproximadamente 30 cms útiles de cuerda para realizar el nudo terminal con el extremo final de la cuerda al quedar completas el número de vueltas. Finalmente se realiza el nudo ya explicado anteriormente.

9.2.2. Unión Tipo Dos

UNIÓN DE TRES GUADUAS TANGENCIALMENTE EN TODA SU LONGITUD CON AMARRE EN ALAMBRE DE ACERO GALVANIZADO DE ϕ 1/8"

Este tipo de unión consiste en amarrar las tres guaduas de la misma longitud en cada uno de sus extremos y en el centro de su longitud, empleando un amarre de varias vueltas en alambre de acero galvanizado de 1/8" de diámetro, el cual se ajusta empleando prensacables o comúnmente conocidos como "perros", que permitan garantizar el pretensionamiento que se le da al alambre de acero galvanizado durante la fabricación de la unión, en el momento del ensayo, de tal forma que la unión permanezca cumpliendo su función.



Foto No. 32. *Detalle de la sección transversal unión tipo dos*

Este tipo de unión presenta otros elementos adicionales, como son una lámina de acero calibre 18 la cual se coloca anterior al alambre, con el objetivo de evitar el posible hundimiento en las paredes de los entrenudos de la guadua, producido por el tensionamiento generado por el alambre y una serie de puntillas de 1" y 1/8" de diámetro dispuestas intercaladamente que restrinjan el movimiento de la lámina en dirección vertical en el sentido longitudinal de la columna. Cabe anotar que estos dos últimos elementos no cumplen una función de trabajo estructural importante dentro de la unión, sólo restringen la deformación de los entrenudos de la guadua y el desplazamiento de la lámina respectivamente.

9.2.2.1. ***Materiales Para La Fabricación De La Unión***

9.2.2.1.1. **Alambre De Acero Galvanizado De ϕ 1/8".**

Un alambre es un filamento o barra fina de un metal flexible que tiene una sección uniforme. Los metales que suelen utilizarse para hacer alambres son cobre, aluminio, acero, latón, hierro, oro, plata y platino.

El diámetro de un alambre de una sola hebra se determina por su calibre, que en los alambres realizados con muchos hilos se determina por el diámetro de su conjunto. El alambre de acero galvanizado, como su nombre lo indica, es un alambre provisto por un recubrimiento de hierro o acero con una capa de zinc como protección a la corrosión. El zinc se aplica con más facilidad y menor costo que otros revestimientos metálicos como el estaño, el cromo, el níquel o el aluminio.



Foto No. 33. Rollos de alambre de acero galvanizado

El método de galvanizado más frecuente es el proceso de inmersión en caliente. Se aplica un baño químico (inmerso en ácido) al hierro para limpiarlo de polvo, grasa y suciedad. Después se lava y se introduce en zinc fundido.

La empresa EMCOCABLES (Empresa Colombiana de Cables), produce alambre de acero galvanizado de 1/8 " , al que se le aplica una capa o recubrimiento de zinc en caliente de alta calidad y su pureza es del 99.99%.

El fabricante suministra las características técnicas más comunes de los cables de acero galvanizado que producen, según normas ASTM A-475-69 y ASTM A 363-65. norma NTC (Norma Técnica Colombiana) 2145.

Tabla No. 9.

Propiedades de los cables de acero galvanizado.

PROPIEDADES DE LOS CABLES DE ACERO GALVANIZADO				
NORMA NTC 2145 (ASTM A – 475-69 Y A 363-85)				
Diámetro (in)	Diámetro (mm)	Peso (kg/Km)	Carga de ruptura (kg)	Peso de zinc (kg/m ³)
1/8	3.2	47.3	830	0.64
3/16	4.8	108.0	1810	0.72
1/4	6.3	180.0	3020	0.79

Para realizar el diseño de las uniones tipo dos, además de tener en consideración las cargas de ruptura suministradas por el fabricante, se realizaron pruebas de resistencia a la tensión en el laboratorio (ensayos preliminares) de algunos tramos de alambre de acero galvanizado de 1/8", con el objetivo de corroborar la información suministrada y

obtener mayores datos de referencia para la elaboración del diseño de la unión. Los resultados de dichas ensayos preliminares se muestran a continuación

- **Ensayos preliminares**

El alambre se acero galvanizado de 1/8", según las recomendaciones del fabricante, tiene una carga de ruptura de 830 Kgf y una carga admisible de 600 Kgf.

Para verificar que el alambre utilizado sí cumple con los requisitos, se realizaron ensayos a tensión con muestras de alambre de 50 cm de longitud, los resultados obtenidos fueron:

Tabla No. 10.
Resistencia a tensión de alambre de acero galvanizado de 1/8".

ENSAYO #	RESISTENCIA A TENSIÓN (Kgf)
1	890
2	850
3	880
Promedio	873

La resistencia promedio fue de 873 Kgf, lo cual indica que la carga de rotura y la carga admisible dadas por el fabricante sí cumplen según las especificaciones de la norma ASTM y NTC.

9.2.2.1.2. Prensacables Para Alambre De Acero De 1/8"

Un prensacable o comúnmente llamado "perro", es un accesorio que cumple la función de grapa, el cual está provisto por un sistema de tuercas que permite apretar para garantizar el ajuste seguro de un cable.

A continuación se muestran las especificaciones técnicas para la utilización de los prensacables para alambre de acero galvanizado de 1/8".



Figura No. 16.
Prensacable

Tabla No. 11.
Especificaciones técnicas para el uso de prensacables.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL USO DE PRENSACABLES				
Diámetro del cable (in)	Diámetro del prensacable (in)	Cantidad mínima de prensacables	Longitud del cable a doblar desde la eslinga (in)	Torque (libras-pie)
1/8"	1/8"	2	3 ¼"	4.5

- **Recomendaciones**

En amarres de cables, se debe cuidar que los extremos de la "U", queden siempre orientados hacia el lado largo o extremo "vivo" del cable, de esta manera se obtienen un mejor comportamiento del montaje.



Figura No. 17. *Detalle de la forma correcta de colocar los prensacables*



Foto No. 34. *torcómetro.*

Las tuercas de los prensacables deben ser apretadas alternativamente hasta alcanzar el torque requerido. El torque alcanzado siempre debe ser verificado durante la realización de los montajes. Para garantizar que el torque que se debe aplicar a las tuercas del prensacable sea el adecuado, se emplea un instrumento de precisión que permite medir el torque llamado torcómetro.

Es importante, utilizar para prensacables el mismo diámetro de los cables y no exceder el máximo de cargas o tensiones recomendadas.

9.2.2.1.3. Lámina De Acero Calibre 18

Esta lámina se coloca anterior al alambre, con el objetivo de distribuir mejor los esfuerzos y evitar la posible deformación (hundimiento) en las paredes de los entrenudos de la guadua, producido por el tensionamiento generado por el alambre. Hay que aclarar que esta lámina no cumple ninguna función como elemento estructural. La lámina a emplear será de 1.20 metros de longitud y 5 cm de ancho.



Foto No. 35. *Detalle de la lámina de acero calibre 18 en la unión tipo dos*

9.2.2.1.4. Puntillas De 1" X 1/8"

El objetivo de las puntillas es que restrinjan el movimiento de la lámina en dirección vertical en el sentido longitudinal de la columna.

- **Determinación Del Número De Vueltas**

Esta unión al igual que en la unión tipo uno, requiere un número determinado de vueltas que garantice el correcto funcionamiento de esta. El número de vueltas tiene en cuenta también dos parámetros.

El primero es el esfuerzo admisible de tensión que es capaz de soportar el alambre de acero galvanizado y el segundo es la fuerza lateral producida al pandearse una columna individual de guadua.

Para el estudio se supone que la fuerza lateral es del 10%, por ser el estado más crítico. En el capítulo 10, se muestra el cálculo del número de vueltas necesarios para realizar la unión.

- **Procedimiento de armado**

Se seleccionan las tres guaduas de tres metros de longitud, de tal forma que presenten características similares de diámetro y separación entre nudos.

La determinación del lugar donde se va arriostrar la columna en el centro de la misma, se hace una vez que se encuentran alineadas las tres guaduas con respecto a un nivel horizontal en uno de los extremos, se debe procurar que en el punto donde se va a colocar una unión coincidan los nudos intermedios de cada una de las tres guaduas, esto con el objeto de evitar la deformación en las paredes de los entrenudos de la guadua.

Cuando los nudos en el centro de la longitud de las tres guaduas no coincidan exactamente, se procurará que por lo menos dos de ellos coincidan o queden lo mas próximos que sea posible para garantizar que no se presente hundimiento de la pared del entrenudo.

Para facilitar la construcción de las uniones, se disponen las guaduas de manera horizontal, de acuerdo con la sección que se desea dar (Figuras No. 18 y 19) se marcará exactamente los nudos sobre los cuales se efectuará la unión.

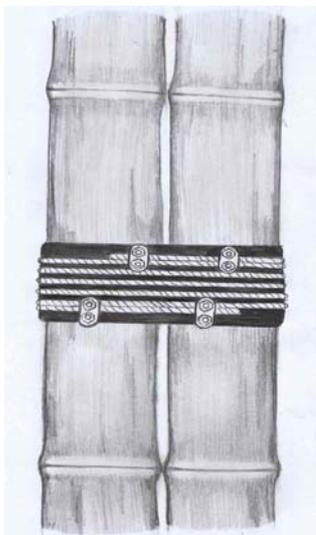


Figura No. 18. Esquema de la unión tipo dos.

Con la lámina de 5.0 cm de ancho calibre 18, de 1.20 m de longitud, se procede inicialmente a darle una forma preliminar de la sección transversal, enrollándola despacio y cuidadosamente alrededor de las tres guaduas unidas, para facilitar este paso es aconsejable dejar unidas previamente las guaduas con una cuerda.

Una vez que se tenga la forma preliminar de la lámina, se dan las 5 vueltas necesarias con el alambre de acero galvanizado, suministrando la tensión necesaria y cuidando de dejar libres los dos extremos para realizar el ajuste con los prensacables o perros.

En el ajuste de los prensacables, se requiere tener precisión en el apretado de las tuercas que lo conforman, para lo cual se empleó un torcómetro, este instrumento permite determinar con precisión el torque que se le va suministrando a la tuerca, lo cual es importante para no provocar un estrangulamiento alrededor del alambre ó generar una falla de corte en el tornillo.

Una vez se ha colocado el alambre, se ha tensionado y se ha ajustado con los prensacables, de tal forma que la unión ya no requiere mas tensionamiento, se procede a garantizar su posición en el elemento compuesto, por medio de la fijación de la lámina a la guadua empleando las puntillas de 1"x1/8", las cuales se insertan hasta la mitad de su longitud en la guadua y luego se doblan hacia la lámina, de tal forma que queden como ganchos, cumpliendo eficazmente con su función de restringir el desplazamiento de la lámina.

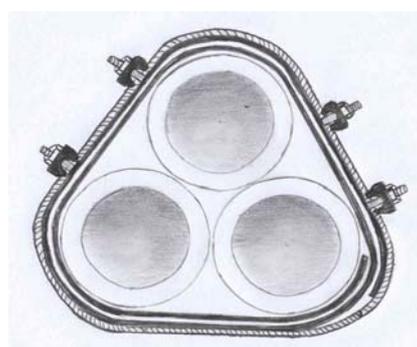


Figura No. 19. Esquema de la sección transversal de la unión tipo dos

9.2.3. Unión Tipo Tres

UNIÓN DE TRES GUADUAS SEPARADAS EN TODA SU LONGITUD EMPLEANDO BAMBÚES, CON AMARRE EN CUERDA DE POLIPROPILENO DE 3/16".

Este tipo de unión consiste en amarrar las tres guaduas en cada uno de sus extremos y en el centro de su longitud, de tal forma que las guaduas no se toquen entre sí, para lograr dicho objetivo, se disponen elementos pequeños de bambú de aproximadamente 10 cm de longitud, cuyo eje longitudinal va dispuesto en dirección perpendicular desde el eje longitudinal de una guadua al eje longitudinal de la otra, teniendo en cuenta que la sección transversal compuesta es un "triángulo". El empalme entre los elementos transversales pequeños de bambú y las guaduas longitudinales, se realiza empleando una masilla de propiedades adhesivas.



Foto No. 36. Sección de la unión tipo tres con el amarre de cuerda realizado

Adicionalmente se realiza un amarre en cuerda de polipropileno de 3/16" de diámetro, la cual se ajusta empleando el mismo nudo que en la unión tipo uno, que permita garantizar el pretensionamiento que se le da a la cuerda de polipropileno durante la fabricación de la unión, en el momento del ensayo, de tal forma que la unión permanezca cumpliendo su función.

9.2.3.1. **Materiales Empleados**

9.2.3.1.1. **Bambúes**

Se emplearon elementos pequeños de bambú de las siguientes características:

- Longitud de 10 cm
- Diámetro exterior entre los 3.5 y 4.0 cm
- Extremos rectos



Foto No. 37. Bambúes en la sección de la unión tipo tres

9.2.3.1.2. Masilla Adhesiva

Esta masa empleada para el empalme de los bambúes y las otras guaduas, es una combinación de dos materiales. Un pegamento o adhesivo para madera, CARPINCOL MR-60 y aserrín de guadua. Esta masilla adhesiva permite que no sea necesario realizar cortes de boca de pescado en los bambúes, lo cual debilitaría el material, ya que al realizar la unión del elemento de columna y el bambú se puede utilizar la masilla como material rellenable y de cohesión, adicionalmente no se requiere que esta unión trabaje estructuralmente.

- **Realización De La Masilla**

Las características físicas del pegamento CARPINCOL MR-60, lo hacen un líquido espeso, pero no lo suficiente como para garantizar que en el momento de aplicarlo a las superficies a unir este se quedará estático, sin deslizarse y formará una película lo suficientemente gruesa y consistente hasta el momento de endurecer, lo cual sería garantía de que dejara fijo de manera adecuada el bambú a la pared de la guadua.



Foto No. 38. Detalle de la masilla en la unión tipo tres

Al presentarse este problema, la solución era procurar transformar el pegamento en una sustancia más densa de fácil maleabilidad y trabajabilidad como una especie de arcilla que permitiera darle forma al momento de realizar el empalme. Para lograr este objetivo se diseñó una masilla conformada por pegamento CARPINCOL MR-60 y aserrín de guadua.

Se deposita sobre un recipiente una cantidad considerable de carpincol, posteriormente se va adicionando el aserrín de guadua y simultáneamente se va agitando la mezcla hasta que el aserrín quede empapado por el pegante, se sigue adicionando hasta lograr que la mezcla quede homogénea y se visualice el pegante con un ligero jaspeado.

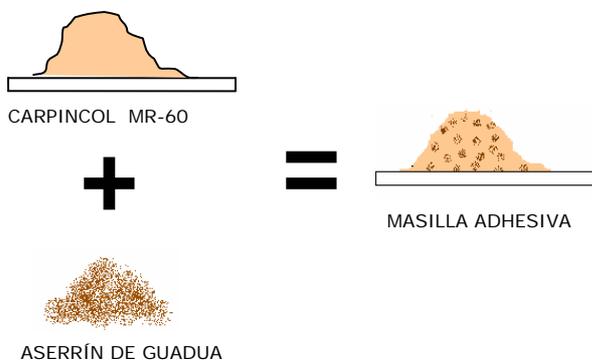


Figura No. 20. Mezcla realizada para preparar la masilla adhesiva.

- **Determinación Del Número De Vueltas**

La unión número tres se diseña de la misma forma que la unión tipo uno, teniendo en cuenta el esfuerzo admisible de tensión que es capaz de soportar la cuerda de polipropileno y la fuerza lateral producida al pandearse una columna individual de guadua. Esta fuerza lateral se considera para el estudio que es del 10%, por ser el estado mas crítico.

En el capítulo 10 se muestra el cálculo del número de vueltas necesarios para realizar la unión.

- **Procedimiento de armado**

Se seleccionan las tres guaduas (para cada probeta) de tal forma que presenten características similares de diámetro y separación entre nudos.

Se seleccionan las nueve secciones de bambú de 10 cm de longitud, que constituirán los separadores de la sección transversal (para cada probeta).

La determinación del lugar donde se va arriistrar la columna en el centro de la misma, se hace una vez que se encuentran alineadas las tres guaduas con respecto a un nivel horizontal en uno de los extremos, se debe procurar que en el punto donde se va a colocar una unión coincidan los nudos intermedios de cada una de las tres guaduas, esto con el objeto de evitar el aplastamiento en los entrenudos.

Cuando los nudos en el centro de la longitud de las tres guaduas no coincidan exactamente, se procurará que por lo menos dos de ellos coincidan o queden lo mas próximos que sea posible para garantizar que no se presente hundimiento de la pared del entrenudo.

Se prepara la masilla adhesiva, la cantidad suficiente para tenerla lista al momento de emplearla. de acuerdo con la sección que se desea dar, se marcará exactamente los nudos sobre los cuales se efectuará la unión.

Para facilitar la construcción de las uniones, se disponen primero dos de las guaduas de manera horizontal sobre el suelo apoyadas en sus extremos y centro por algún soporte inferior que permita una pequeña elevación del suelo, inicialmente se toma carpincol puro y se agrega a la superficie externa del bambú y de la guadua sobre la cual se apoyará el bambú, se deja secar ligeramente y se unen, inmediatamente se comienza a rellenar alrededor de los dos extremos a unir, con la masilla previamente preparada, tratando de moldearlo como un cono truncado, preferiblemente con la



Foto No. 39. Detalle de la sección transversal en la unión tipo tres

ayuda de los dedos , luego de que se le ha dado la forma, se deja quieto para que seque sin ninguna intervención adicional.



Foto No. 40. Unión tipo tres en el centro de la longitud de la columna

Para facilitar el armado total de la probeta , se hacen las tres uniones inferiores primero, y luego con la ayuda de un montaje se apoya la tercera guadua en algunos soportes y se va realizando el mismo procedimiento hasta obtenerse la sección transversal que se busca.

En el momento de armado de la sección transversal se debe procurar que el eje longitudinal de los bambúes coincidan con el centroide de la sección transversal de las guaduas.

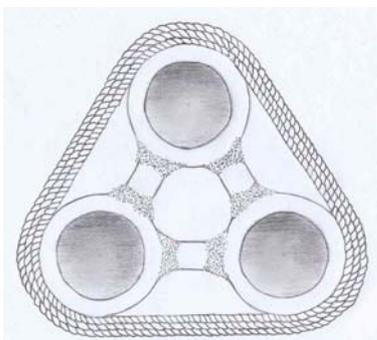


Figura No. 21. Esquema de la sección transversal de la unión tipo tres.

Las probetas se dejan inmóviles por un tiempo aproximado de una semana, para darle tiempo a la masilla adhesiva de que seque completamente.

Posteriormente al tiempo de secado, las probetas se deben amarrar con la cuerda de polipropileno como en las probetas tipo uno ya que estas son las encargadas de mantener las guaduas unidas. Los elementos de bambú solo realizan la función de separación para incrementar el radio de giro de la columna.

La organización de la disposición del número de vueltas que se deben dar con la cuerda en la unión, se realiza en un total de tres hileras, en la primera de las hileras se disponen 15 vueltas, en la segunda 13 vueltas y en la tercera y última 12, esta disposición es para evitar que la longitud de la unión se prolongue a los entrenudos, lo cual provocaría la deformación o hundimiento de las paredes de los mismos.

Al iniciar la primera vuelta, se debe tener la precaución de no olvidar dejar aproximadamente 30 cm útiles de cuerda para realizar el nudo terminal con el extremo final de la cuerda al quedar completas el número de vueltas.

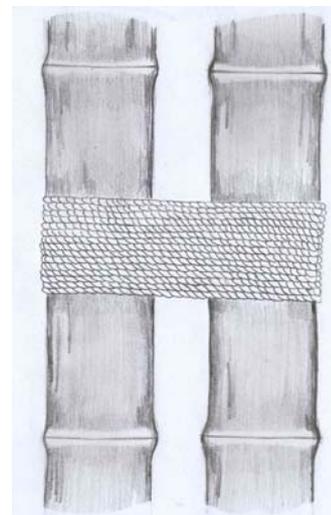


Figura No. 22. Esquema de la unión tipo tres.

Finalmente se realiza el nudo ya explicado anteriormente en el diseño y procedimiento de armado de unión tipo uno.

10. CÁLCULOS Y RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y que son base para realizar el análisis, que está enfocado al diseño de estructuras en guadua siguiendo los procedimientos utilizados normalmente en el diseño de estructuras de madera, según la metodología planteada por el Manual de Maderas del Grupo Andino.

10.1. CÁLCULOS PRELIMINARES

Antes de realizar cualquier ensayo, se tomaron los datos correspondientes a la geometría de las probetas, se obtuvieron promedios de altura, diámetros, espesores, pesos de muestras de guadua⁵².

Con base en estos datos se calcularon las áreas de los extremos inferior y superior, los radios de giro, la relación de esbeltez, contenido de humedad y densidad que se presentan en las Tablas No. 12, 13, 14, 15 y en el Anexo D. A continuación se presentan las formulas empleadas para el cálculo de estas propiedades:

10.1.1. Área (A)

$$A = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - (d_e - 2e)^2)$$

Donde:

A : Área de la sección transversal.

d_e : Diámetro exterior promedio.

e : Espesor promedio de la pared.

10.1.2. Radio De Giro (r)

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi(d_e^4 - d_i^4)/64}{\pi(d_e^2 - d_i^2)/4}} = \sqrt{\frac{(d_e^4 - d_i^4)}{16(d_e^2 - d_i^2)}}$$

⁵² Ver Anexo D

Donde:

r : Radio de giro de la sección transversal.

d_e : Diámetro exterior promedio.

d_i: Diámetro interior promedio.

10.1.3. Relación De Esbeltez (λ)

$$\lambda = \frac{L}{r}$$

Donde:

λ : relación de esbeltez

L : Altura promedio de la probeta

r : Radio de giro de la sección transversal.

El cálculo del contenido de humedad de las muestras de guadua tomadas de las diferentes probetas ensayadas, se llevó a cabo según la formulación dada en el Capítulo 7. Propiedades Físicas y Mecánicas, numeral 7.1.1. Contenido de Humedad (CH), según el procedimiento de ensayo descrito en el Capítulo 8. Metodología de Trabajo, numeral 8.4.1. Ensayo de Humedad.

El cálculo de la densidad básica de las muestras de guadua tomadas de las diferentes probetas ensayadas, se llevó a cabo según la formulación dada en el Capítulo 7. Propiedades Físicas y Mecánicas, numeral 7.1.2. Densidad Básica (DB), según el procedimiento de ensayo descrito en el Capítulo 8. Metodología de Trabajo, numeral 8.4.2. Ensayo de Densidad Básica.

10.2. TIPOS DE FALLAS

El análisis del comportamiento de las diferentes probetas ensayadas, depende principalmente del tipo de falla que presentan al ensayarse bajo sollicitaciones de carga a compresión. La identificación de este tipo de fallas en las probetas ensayadas, permite realizar una clasificación y proponer posibles diferentes relaciones, entre este fenómeno y características propias de las probetas, tales como longitud, relación de esbeltez, etc, lo cual permite realizar un análisis mas profundo del comportamiento de elementos de columnas.

A continuación se enumeran y explican las fallas representativas.

10.2.1. Falla Por Aplastamiento (Ap)

Esta falla es típica de probetas cortas, se presenta cuando la guadua se abre a lo largo del eje longitudinal de las probetas.

En las Foto No. 41 se muestra este tipo de falla, que ocurrió luego de ensayar una probeta de 0.80 m; en el Anexo B (Fotos No. 59, 60, 61 y 62), se muestra este tipo de falla ocurrida en las probetas utilizadas para determinar el módulo de elasticidad.



Foto No. 41. Falla por aplastamiento

10.2.2. Falla Por Pandeo (P)

Cuando en las columnas largas se alcanza una carga mayor a la crítica, comienza a presentarse deflexión lateral o mas conocido como pandeo. Se caracteriza por el aplastamiento que se produce en la parte cóncava de la probeta, en tanto que en la parte convexa, no se aprecia ningún tipo de falla.

Esta se localizó principalmente en la zona intermedia de la probeta. En las Fotos No. 52 y 53 del Anexo B, se muestra la falla por pandeo presentada en columnas largas y en la Foto No. 42 se presenta un detalle de la zona central donde se produce la falla.



Foto No. 42. Falla por pandeo.

10.2.3. Falla Intermedia Entre Pandeo Y Aplastamiento (In)

Las columnas que fallaron de esta forma, presentan al comienzo pandeo leve, produciéndose aplastamiento en la parte cóncava y luego termina por producirse una falla similar a la descrita en el numeral 10.2.1, es decir, que falla por aplastamiento. Esta falla se presentó pocas veces, sucedió en probetas con longitudes entre 1.0 y 1.5 metros. En las Fotos No. 57 y 58 en el Anexo B, se muestra la forma característica de esta falla.

10.3. LÍMITE DE EXCLUSIÓN

En la metodología propuesta en el Manual de Maderas para el Grupo Andino⁵³, se asume el valor del ensayo correspondiente al límite de exclusión del 5 % ó 0.05N como dato representativo para cada tipo de probeta; donde N es el número total de probetas ensayadas, las cuales se ordenan de forma ascendente. De esta forma se espera que de toda la población existente de guadua solamente el 5% tenga una resistencia menor a este valor.

10.4. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para la determinación del módulo de elasticidad de la guadua, se sigue la metodología propuesta por las Normas Internacionales para Ensayos de Bambú "STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPIERTIES OF BAMBOO", estas normas, especifican para el ensayo de compresión paralela a la fibra, una altura de la probeta entre 1 y 2 veces el diámetro, precisamente para que el ensayo evalúe las propiedades del material, sin que sea afectado por efectos secundarios como el pando.

Para cada una de las probetas se tomaron lecturas de carga contra deformación con el fin de determinar el módulo de elasticidad de cada probeta. En el Anexo E se presentan los resultados de cada uno de los ensayos y las curvas esfuerzo-deformación y en la Tabla No. 12 se presenta un resumen de todos los ensayos de determinación del módulo de elasticidad y de resistencia máxima a compresión.

Para realizar el diseño de las uniones, se hizo necesario calcular el valor del esfuerzo máximo promedio a compresión , que corresponde a un esfuerzo de 504.37 Kg/cm².

En la Tabla No. 12, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos:

⁵³ JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Op. Cit. P. 7-6.

Tabla No. 12.
Ensayos de compresión para determinar el módulo de elasticidad

Probeta #	L (cm)	d _e (cm)	e (cm)	E (Kg/cm ²)	Pmax (Kg)	A (cm ²)	σ _u (Kg/cm ²)	CH (%)	DB (gr/cm ³)
E-05	8.59	8.42	1.62	69006	19200	34.64	554.33	23.62	0.791
E-06	9.67	9.59	1.21	80196	14500	31.84	455.37	17.10	0.671
E-08	8.68	8.72	1.04	79422	11500	25.02	459.58	15.68	0.731
E-11	9.56	9.43	1.87	59485	18100	44.40	407.63	21.46	0.632
E-13	8.39	8.33	1.27	66552	10600	28.15	376.49	20.17	0.617
E-14	8.87	8.78	1.61	67560	17700	36.31	487.51	19.82	0.669
E-18	9.84	9.87	1.14	88507	15600	31.28	498.76	15.65	0.773
E-19	9.23	9.03	1.02	97706	13900	25.69	541.11	14.39	0.643
E-21	7.08	7.15	0.83	83616	8050	16.54	486.79	16.38	0.670
E-22	7.75	7.73	0.71	69663	7400	15.63	473.37	16.58	0.673
E-25	9.46	9.45	1.12	45819	15900	29.26	543.40	20.21	0.694
E-29	9.25	9.29	0.96	49076	12300	25.17	488.65	18.20	0.745
E-31	10.59	10.49	1.08	63155	19400	31.79	610.35	14.75	0.798
E-34	9.63	9.64	1.71	43479	18400	42.68	431.08	25.64	0.769
E-39	9.06	8.91	1.32	82398	18600	31.53	589.85	13.62	0.781
E-41	8.85	8.86	1.26	46142	14500	30.12	481.35	18.07	0.793
E-42	8.97	8.85	1.20	69320	16000	28.81	555.44	14.41	0.677
E-43	8.38	8.36	1.02	61621	14500	23.43	618.96	20.14	0.809
E-44	8.30	8.34	1.00	67532	10500	23.11	454.35	19.02	0.758
E-45	8.34	8.31	0.95	49515	12600	21.98	573.13	19.68	0.813
Maximo	10.59	10.49	1.87	97706	19400.00	44.40	618.96	25.64	0.81
Minimo	7.08	7.15	0.71	43479	7400.00	15.63	376.49	13.62	0.62
Desv. Est	0.79	0.77	0.30	15266.88	3610.98	7.36	66.78	3.20	0.06
Promedio	8.92	8.88	1.20	66989	14462.50	28.87	504.37	18.23	0.73

10.5. ENSAYO DE COLUMNAS INDIVIDUALES

Es importante definir el comportamiento de columnas de guadua individuales sometidas a compresión axial para poder compararlo con las columnas armadas con tres guadas y determinar la funcionalidad de realizar columnas compuestas.

Los ensayos se realizaron en probetas entre los 0.50 y 3.00 metros. Con los resultados obtenidos se realizó la gráfica de esfuerzo contra relación de esbeltez, con la cual se determina el comportamiento de las columnas. A continuación se presentan los resultados obtenidos, organizados según el tipo de falla que se presentó en cada columna.

Tabla No. 13.
Ensayo de columnas individuales que fallaron por aplastamiento.

Probeta	L (m)	d _e (cm)	e (cm)	r (cm)	λ	A (cm ²)	Carga (Kg)	σ _u (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)	CH (%)	DB (gr/cm ³)
A62	0.50	9.57	1.24	2.98	16.81	32.49	15400	474.05	13566.6	19.61	0.510
A75	0.50	8.04	1.24	2.44	20.46	26.38	11500	435.89	18492.3	17.19	0.640
A65	0.80	7.91	0.74	2.55	31.40	16.72	8900	532.32	53183.3	19.05	0.700
A67	0.80	9.03	1.28	2.78	28.82	31.14	11000	353.19	29732.8	22.64	0.589
A68	0.80	9.88	1.16	3.11	25.72	31.79	15600	490.77	32881.4	19.35	0.620
A70	0.80	9.50	1.51	2.87	27.83	37.78	14000	370.59	29082.4	25.37	0.515
A66	0.90	8.46	1.02	2.65	33.90	23.78	9800	412.07	47978.9	20.90	0.558
A69	0.90	9.75	1.25	3.04	29.63	33.25	15800	475.25	42280.3	20.00	0.550
A63	1.00	8.66	1.18	2.68	37.34	27.62	13500	488.76	69058.4	19.72	0.710
A72	1.20	8.04	1.19	2.46	48.82	25.55	9500	371.75	89776.3	31.15	0.508

Tabla No. 14.

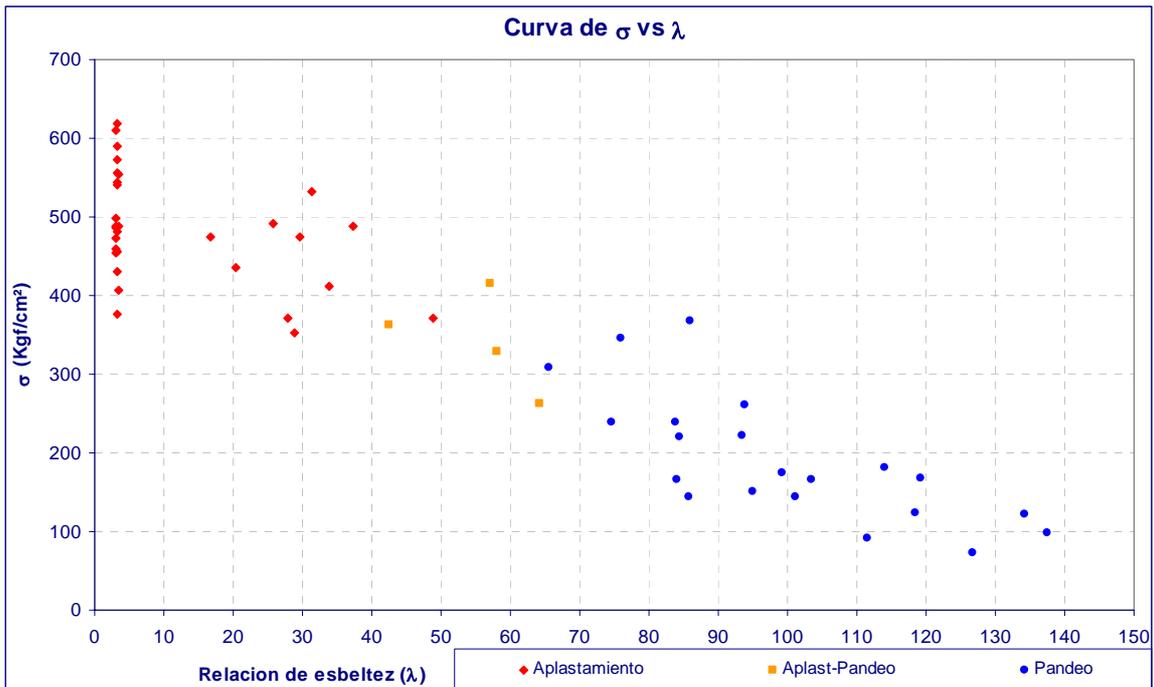
Ensayo de columnas individuales que fallaron simultáneamente por pandeo y aplastamiento.

Probeta	L (m)	d _e (cm)	e (cm)	r (cm)	λ	A (cm ²)	Carga (Kgf)	σ _u (Kgf/cm ²)	E (Kgf/cm ²)	CH (%)	DB (gr/cm ³)
A74	1.00	7.84	1.31	2.35	42.47	26.77	9700	362.32	66229.9	29.17	0.533
A64	1.50	8.56	1.40	2.58	58.12	31.40	10300	328.02	112274.0	22.00	0.625
A73	1.50	7.63	1.12	2.34	64.21	22.81	6000	263.01	109877.5	27.87	0.610
A76	1.50	8.54	1.22	2.62	57.16	27.95	11600	415.02	137382.4	23.40	0.627

Tabla No. 15.

Ensayo de columnas individuales que fallaron por pandeo.

Probeta	L (m)	d _e (cm)	e (cm)	r (cm)	λ	A (cm ²)	Carga (Kgf)	σ _u (Kgf/cm ²)	E (Kgf/cm ²)	CH (%)	DB (gr/cm ³)
A71	1.50	7.41	1.02	2.29	65.52	20.44	6300	308.19	134044.8	24.56	0.570
A03	2.00	8.61	1.27	2.63	75.92	29.18	10100	346.13	202160.5	16.67	0.700
A06	2.50	7.53	0.73	2.42	103.50	15.63	2600	166.34	180541.0	19.88	0.560
A18	2.50	9.45	1.30	2.92	85.70	33.34	4800	143.98	107139.9	20.60	0.704
A19	2.50	9.48	1.12	2.98	83.81	29.36	7000	238.43	169697.5	16.05	0.675
A20	2.50	9.72	1.48	2.96	84.47	38.18	8400	219.99	159048.0	17.20	0.581
A21	2.50	8.65	1.33	2.63	95.07	30.63	4600	150.17	137516.7	18.28	0.677
A42	2.50	10.70	1.30	3.35	74.55	38.37	9200	239.77	135032.3	24.18	0.692
A49	2.50	9.29	1.14	2.91	85.93	29.12	10700	367.39	274853.5	17.35	0.576
A53	2.50	9.79	1.51	2.97	84.08	39.31	6500	165.36	118453.4	17.86	0.600
A23	3.00	9.58	1.30	2.96	101.21	33.83	4900	144.86	150342.5	19.32	0.587
A24	3.00	10.31	1.32	3.21	93.38	37.35	8300	222.21	196330.6	21.21	0.707
A28	3.00	9.60	1.12	3.03	99.15	29.72	5200	174.96	174269.1	23.17	0.631
A30	3.00	8.36	0.98	2.63	114.02	22.66	4100	180.97	238376.9	17.70	0.685
A34	3.00	8.87	1.39	2.69	111.53	32.66	3000	91.84	115755.2	19.79	0.533
A46	3.00	10.27	1.31	3.20	93.76	36.85	9600	260.49	232001.2	20.59	0.674
A59	3.00	7.25	1.01	2.24	134.20	19.71	2400	121.77	222197.6	18.18	0.578
A77	3.00	7.43	0.78	2.37	126.68	16.30	1200	73.61	119697.5	18.18	0.550
A78	3.00	6.86	0.74	2.18	137.59	14.23	1400	98.36	188666.3	16.39	0.610
A79	3.00	8.01	0.91	2.53	118.54	20.30	2500	123.17	175359.8	19.35	0.689
A80	3.00	8.16	1.14	2.52	119.23	25.10	4200	167.30	240991.6	18.97	0.580



Gráfica No. 1. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para columnas individuales.

10.6. DISEÑO DE UNIONES

Con los datos de esfuerzos máximos a compresión obtenidos en el ensayo para determinar el módulo de elasticidad, se determinó un esfuerzo máximo a compresión de 504.37 Kgf/cm², para probetas cortas.

El esfuerzo de diseño de las uniones se calcula a partir de la fuerza lateral que se produce por el pandeo de la columna de guadua y que se asume como el 10% de la carga axial a compresión sobre las columnas de guadua, teniendo en cuenta el criterio de la fuerza lateral requerida para los arriostramientos laterales en vigas de pórticos, según el artículo "Seismic Design Practice For Eccentrally Braced Frames" por Roy Becker y Michael Ishler, basado en la edición de 1994 del Uniform Building Code seismic (UBC) numeral 3.21. Beam lateral bracing⁵⁴.

La carga axial con la cual se determinó la fuerza lateral, es la carga que corresponde al límite entre columnas intermedias y largas, que es aproximadamente el esfuerzo en el límite proporcional (σ_{lp}).

El esfuerzo en el límite proporcional según se presentó anteriormente⁵⁵ es:

$$\sigma_{lp} = \frac{2}{3} \sigma_u^{56}, \quad \sigma_{lp} = \frac{2}{3} * 504.37$$
$$\sigma_{lp} = 336.0 \text{ Kgf/cm}^2$$

Tomando 28 cm² como área promedio de la sección transversal de una guadua⁵⁷, se calcula la carga axial máxima que se aplicaría sobre las columnas compuestas por tres guaduas, sobre las cuales se prueban las uniones.

$$P_{max} = 336 \text{ Kg/cm}^2 * 28 \text{ cm}^2 * 3$$

⁵⁴ En el UBC, numeral 2211.10.18 se especifica el requerimiento necesario para los arriostramientos en la parte superior e inferior de las aletas de una viga de amarre que vaya a ser arriostrada en algún intervalo específico; este requerimiento es independiente de la configuración del pórtico. El UBC especifica que el arriostramiento debe resistir el 6 % del esfuerzo que presenta la aleta de la viga de amarre.

⁵⁵ Capítulo 7.2.2. P.62

⁵⁶ σ_u : Esfuerzo máximo a compresión en probetas cortas

⁵⁷ El promedio del área de la sección transversal de la guaduas ensayadas es 28.2 cm². Ver Tablas No. 12, 13, 14 y 15.

$$P_{max} = 28224 \text{ Kgf}$$

La fuerza lateral (F_l) será:

$$F_l = 28224 \text{ Kgf} * 0.10$$

$$F_l = 2822.4 \text{ Kgf}$$

Una vez determinado el valor de la fuerza lateral, se procede a calcular el número de vueltas que requiere cada tipo de unión.

El número de vueltas se determina de la siguiente manera:

$$\# \text{ Vueltas} = \frac{F_l}{P_{adm}}$$

Donde:

F_l : Fuerza lateral que se genera al presentarse pandeo en un elemento largo de guadua

P_{adm} : Carga admisible del material con que se realiza la unión⁵⁸.

En la Tabla No. 16, se muestran los cálculos obtenidos para el diseño de cada unión.

Tabla No. 16.
Número de vueltas requeridas para cada unión.

TIPO DE UNION	MATERIAL	F_l (Kgf)	P_{adm} (Kgf)	# Vueltas
1	Cuerda de polipropileno 3/16"	2822	72	40
2	Alambre de acero de 1/8"	2822	600	5
3	Cuerda de polipropileno 3/16"	2822	72	40

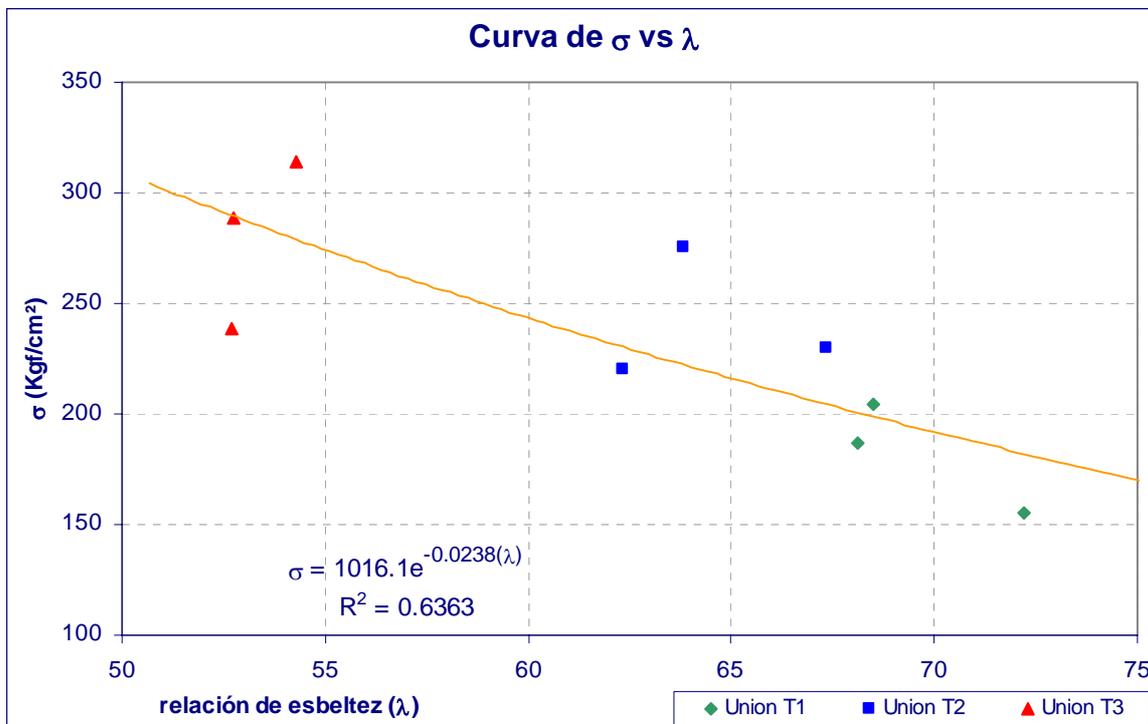
10.7. ENSAYO DE COLUMNAS ARMADAS CON TRES GUADUAS

Todas las columnas armadas con tres guaduas tienen una longitud de tres metros. Los elementos de columna se subdividen en tres grupos de acuerdo al tipo de unión que presentan, de acuerdo con la clasificación realizada en el Capítulo 8. Descripción y Diseño de Uniones. A continuación, se presentan las principales características geométricas de las probetas de acuerdo a su clasificación en cada uno de los grupos de las uniones tipo, así como la carga y esfuerzo máximo resistido en los ensayos realizados.

⁵⁸ Los valores de cargas admisibles utilizados son los recomendados por el fabricante. Ver Capítulo 9.

Tabla No. 17.
Ensayo de columnas de 3.00 metros armadas con tres guadas.

		#	A (cm ²)		di (cm)		de (cm)		r (cm)	λ	P _{max} (Kgf)	σ _u (Kg/cm ²)
			ind	total	ind	prom	ind	prom				
UNION T1	A	A11	22.59		5.97		8.03		4.15	72.21	12400	155.06
		A17	29.88	79.97	5.56	5.70	8.30	8.15				
		A50	27.50		5.58		8.13					
	B	A14	30.72		6.12		8.75					
		A04	23.89	80.41	6.25	6.30	8.34	8.59				
		A5A	25.80		6.53		8.69					
	C	A10	29.48		6.00		8.58					
		A51	29.92	86.77	6.26	6.07	8.79	8.59				
		A61	27.38		5.96		8.39					
UNION T2	A	A31	31.29		7.24		9.61		4.70	63.81	24350	275.75
		A32	25.49	88.30	6.58	6.81	8.70	9.15				
		A43	31.52		6.61		9.16					
	B	A5B	29.76		7.17		9.45					
		A39	23.19	77.22	7.43	7.33	9.21	9.30				
		A47	24.26		7.38		9.24					
	C	A36	32.31		7.14		9.60					
		A22	27.34	85.71	5.91	6.28	8.35	8.71				
		A45	26.07		5.80		8.18					
UNION T3	A	A27	31.82		7.47		9.81		5.69	52.68	22400	238.96
		A29	31.33	93.74	6.94	7.07	9.38	9.47				
		A40	30.59		6.80		9.23					
	B	A7	27.10		6.68		8.90					
		A7	30.02	84.50	6.98	6.75	9.32	9.03				
		A48	27.37		6.60		8.86					
	C	A25	28.21		7.79		9.83					
		A13	29.60	84.52	7.62	7.25	9.79	9.41				
		A55	26.70		6.35		8.62					



Gráfica No. 2. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para columnas armadas con tres guadas.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos en el estudio, se realizó un análisis del comportamiento de las diferentes columnas de guadua y su relación con algunas propiedades físicas y mecánicas.

11.1. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN

El análisis de las curvas esfuerzo deformación, es muy importante al momento de estudiar el comportamiento de un material, ya que la curva esfuerzo deformación, es característica del mismo y permite establecer parámetros de diseño. En las curvas obtenidas en los ensayos realizados a las probetas cortas⁵⁹ según se observa en la gráfica No. 3, se encontró un comportamiento semejante al que se presenta en las maderas, en donde se pueden apreciar tres zonas de comportamiento diferente.

En la primera zona, se observa un comportamiento no lineal, en el cual se presentan grandes deformaciones bajo pequeños incrementos en la carga, esto se debe al acomodamiento entre dispositivos de carga y los apoyos, con la probeta ensayada, y no propiamente a una deformación de la guadua.

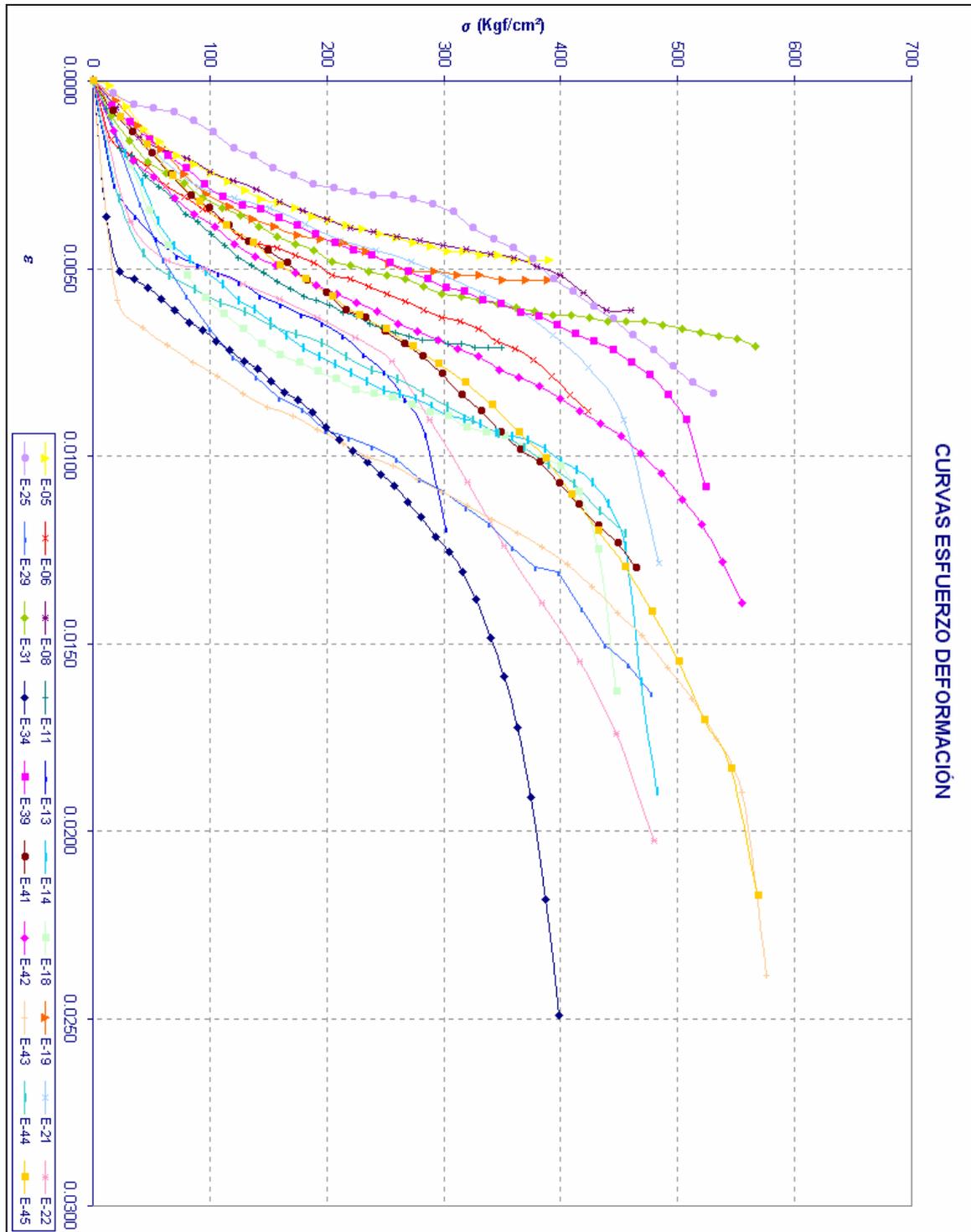
En la segunda zona se presenta una tendencia lineal, que corresponde al rango elástico del material. La pendiente de esta recta determina el módulo de elasticidad (E) del material. Esta tendencia termina en el límite proporcional ó esfuerzo en el límite proporcional (σ_{ip}).

En la tercera zona que va desde el esfuerzo en el límite proporcional hasta que se presenta la falla del material, se le denomina zona plástica.

Este comportamiento se puede observar en las curvas que se muestran en la gráfica No. 3. Nótese como en la segunda zona se presenta una tendencia similar en cuanto a la pendiente de las diferentes curvas esfuerzo deformación para cada una de las

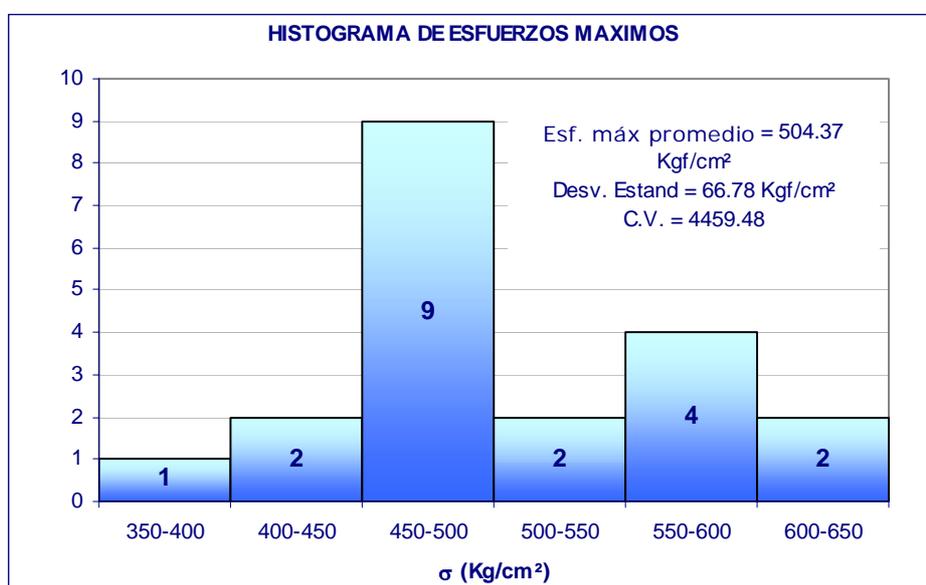
⁵⁹ Ver Anexo E

probetas ensayadas. En cuanto a los niveles de deformación, las diferencias son consecuencia del acomodamiento que tiene cada probeta en la primera zona.



Gráfica No. 3. Curvas esfuerzo deformación obtenidas de las probetas cortas.

Debido a las condiciones del montaje durante los ensayos y a las características físicas de las probetas cortas⁶⁰; que inciden en los resultados finales de la prueba, se presentan diferencias en los esfuerzos máximos a compresión, para discriminar la información obtenida. En la gráfica No. 4, se muestra la distribución de los esfuerzos máximos a compresión, donde se puede observar que dentro del intervalo central (450 – 500 Kg/cm²), se localiza el 45% del total de la población, mientras que por debajo de este valor sólo se encuentra un 15% de los ensayos. Con lo anterior se puede decir que el valor del esfuerzo máximo a compresión de la guadua ensayada, está en un rango entre los 350 Kg/cm² y los 650 Kg/cm², con una desviación estándar de 66.78 Kg/cm².



Gráfica No. 4. Histograma de esfuerzos máximos a compresión.

11.2. CURVA DE ESFUERZO – RELACIÓN DE ESBELTEZ

En elementos esbeltos sometidos a esfuerzos de compresión, como son las probetas tipo A y B, es importante relacionar los esfuerzos máximos a compresión y la relación de esbeltez para realizar el análisis. En el comportamiento de las columnas estudiadas, con respecto a su esbeltez, se pueden diferenciar 3 tipos de comportamiento que dependen de la longitud de las columnas y que se puede apreciar e identificar según el tipo de falla que se presentó.

⁶⁰ El acomodamiento inicial entre el dispositivo de carga y los apoyos, con la probeta y la superficie de la sección transversal de la probeta, que se puede presentar no totalmente plana.

Las probetas que fallaron por aplastamiento, corresponden a las probetas cortas (longitudes comprendidas entre 0.50 m y 1.20 m); aquellas que fallaron por pandeo pertenecen a las columnas largas (longitudes comprendidas entre 1.50 m y 3.00 m). También se presentó una falla donde se identifica el pandeo de la probeta, pero la falla se produjo por el aplastamiento de las fibras de la parte cóncava de la zona de pandeo de la columna, a éstas se les denomina columnas intermedias (longitudes comprendidas entre 1.00 m y 1.50 m).

Los ensayos realizados en las columnas producen valores de relaciones de esbeltez distribuidos en una franja ancha que promedia la curva de comportamiento real de falla de las columnas.

Los resultados obtenidos en los ensayos, se confrontaron con las teorías de columnas expuestas anteriormente en el capítulo 6, aplicando simultáneamente la teoría de Euler para columnas largas y la teoría propuesta por el Manual de Maderas para el Grupo Andino.

Según la teoría de Euler, la carga crítica depende únicamente del módulo de elasticidad de la columna y de su longitud, mientras que para la teoría del Manual de Maderas, el esfuerzo admisible es función del esfuerzo máximo, de la relación de esbeltez de la columna y de la relación de esbeltez crítica. Para poder aplicar simultáneamente las dos teorías se toma la relación de esbeltez crítica, en el punto en que las dos curvas son tangentes, de donde se obtiene que la relación de esbeltez crítica (λ_c) es:

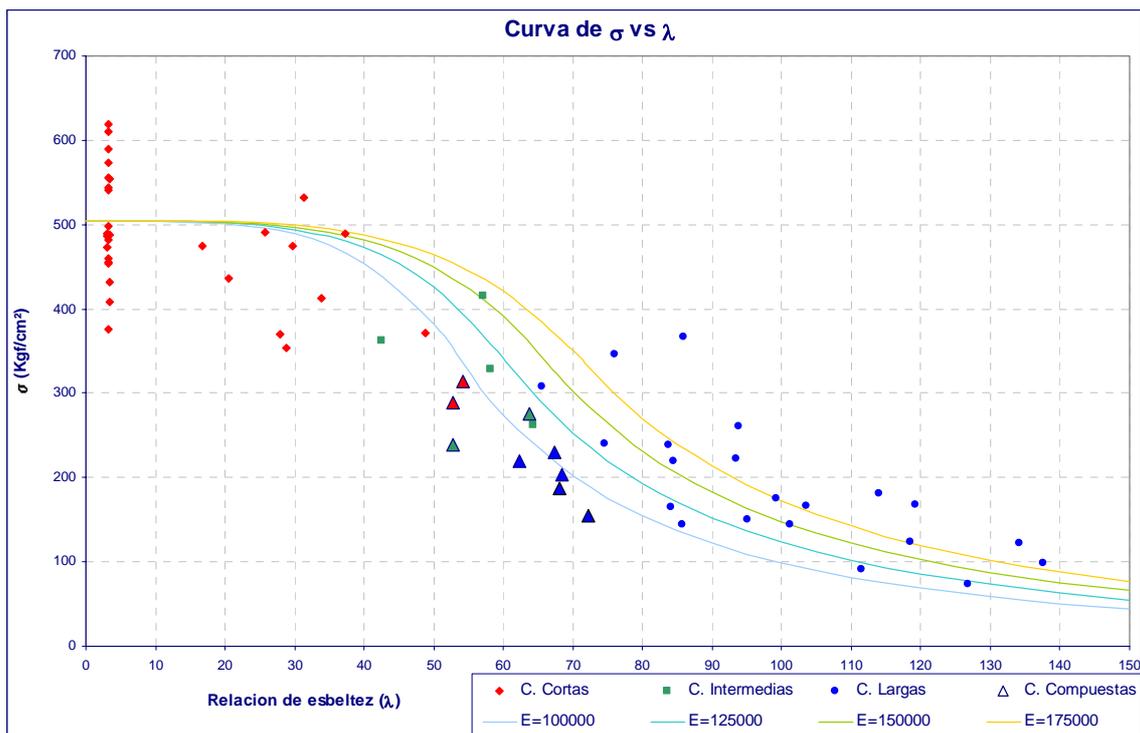
$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{2}{3}\right) \sigma_u}}$$

Nótese que esta ecuación depende del módulo de elasticidad (E), por lo cual las teorías variarán según se asuma un módulo de elasticidad. El esfuerzo máximo (σ_u) empleado fue el valor promedio obtenido en los ensayos, el cual corresponde a 504.37 Kgf/cm². En la siguiente tabla se muestran las diferentes aproximaciones realizadas para varios valores del módulo de elasticidad:

Tabla No. 18.
Relación de esbeltez crítica para diferentes módulos de elasticidad

E (Kgf/cm ²)	λ_c
100000	54.18
125000	60.57
150000	66.35
175000	71.67

Según el tipo de falla, se presenta una zona intermedia, comprendida entre las probetas que fallan por aplastamiento y las que fallan por pandeo, entre las cuales se encuentran las columnas intermedias, esta zona da un indicativo de la relación de esbeltez crítica real, que se encuentra entre 50 y 65, lo cual está acorde con el modelo estudiado, en el cual según la Tabla No. 16 y las curvas teóricas trazadas en la gráfica No. 5, la relación de esbeltez crítica teórica varía entre valores de esbeltez de 54 a 71.



Gráfica No. 5. *Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez para diferentes módulos de elasticidad.*

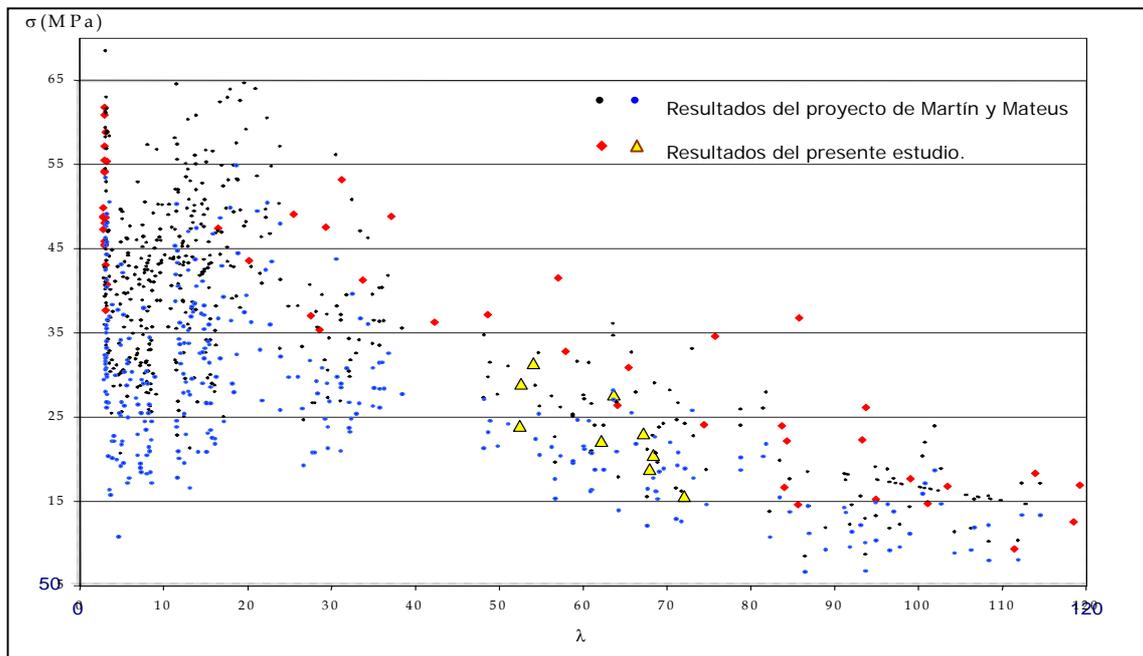
Según se observa en la gráfica No. 5, los datos de los ensayos presentan una alta dispersión; esto se debe a dos circunstancias principalmente. La primera, es tener en cuenta que la guadua no es un material homogéneo en cuanto a su geometría, entre extremo y extremo se presentan cambios, tanto en diámetros como espesores, además que tratándose de guaduas, lo más posible es que tengan pequeñas

curvaturas iniciales. Otro factor es que en el laboratorio es muy difícil garantizar que la aplicación de las cargas se haga a través del eje centroidal de la sección, lo que genera una excentricidad, como consecuencia de ésta, la carga produce una deflexión adicional por el momento que se genera.

Estas dos consideraciones anteriores, contribuyen a la variabilidad de los resultados, debido a que no se puede garantizar que las imperfecciones propias de las probetas de guadua (características morfológicas) o la excentricidad generada sean iguales en dos ensayos, incluso si se trata de muestras del mismo tallo.

Al comparar los ensayos realizados con los resultados obtenidos en el trabajo de grado "Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla" de Martín y Mateus, en la gráfica No. 6 se observa que los resultados obtenidos en este estudio (los puntos cuadrados rojos son las columnas individuales, en tanto que los puntos triangulares amarillos son las columnas armadas con tres guaduas), presentan una tendencia similar a la obtenida en el proyecto de grado referenciado (puntos circulares azules y negros), a pesar de la alta dispersión de datos, sobre todo para relaciones de esbeltez pequeñas, es decir, para probetas cortas, donde se observan datos de esfuerzos desde 18 Mpa hasta casi 70 Mpa. Los resultados obtenidos en este estudio, están dentro de este amplio rango de datos y con una dispersión similar a los obtenidos en el trabajo de Martín y Mateus. La causa de la poca uniformidad de los resultados se debe a la heterogeneidad de la guadua, ya que no es constante ni física ni geométricamente, cambiando en todas las direcciones, tanto longitudinalmente como transversalmente.

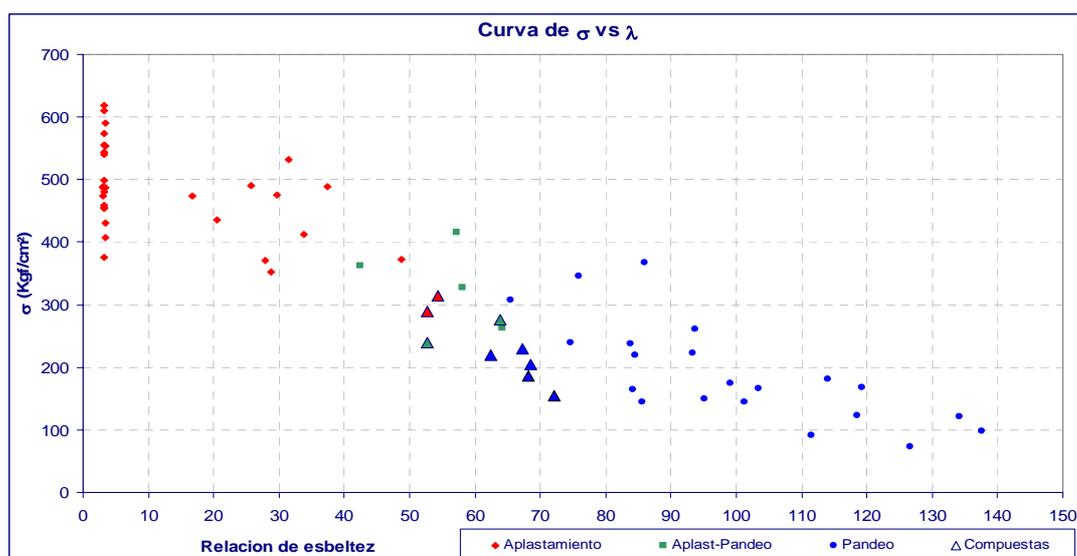
Se puede concluir que pese a tener una tendencia similar a la curva esfuerzo contra relación de esbeltez para columnas de madera, su comportamiento es menos predecible, por lo cual es difícil hablar de una curva específica para la guadua, por lo cual, para utilizar valores de diseño, es más seguro recurrir a criterios como el de límite de exclusión, el cual garantiza que sólo un 5% de la población puede tener resistencias menores al valor determinado.



Gráfica No. 6. Curva esfuerzo contra relación de esbeltez del proyecto "Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla" comparado con los resultados obtenidos en el presente estudio.

11.3. ENSAYO DE COLUMNAS ARMADAS CON TRES GUADUAS

Para dar una mejor idea del comportamiento de las columnas armadas con tres guaduas, estos resultados, se compararon con los obtenidos para las guaduas individuales de tres metros de longitud. En la gráfica No. 7 se presentan las columnas armadas según el tipo de falla que se presentó.



Gráfica No. 7. Curva esfuerzo vs relación de esbeltez para columnas armadas con tres guaduas.

En esta gráfica se puede observar que según la relación de esbeltez de las columnas compuestas, éstas presentan la misma zona de transición entre columnas largas e intermedias (aplastamiento, pandeo-aplastamiento, pandeo) correspondiente a las columnas individuales. En éste caso se observa que la relación de esbeltez es de aproximadamente 60 (Por ejemplo las columnas compuestas con relación de esbeltez de aproximadamente 70 pandearon igual que las columnas individuales con relación de esbeltez similar).

Comparando los resultados obtenidos de las columnas compuestas con las columnas individuales de 3.00 metros de longitud, es posible analizar la eficiencia que tiene el unir guaduas con el fin de que trabajen como un solo elemento.

Para una guadua individual de tres metros de longitud, se obtuvo un esfuerzo promedio de 150.87 Kgf/cm² para una relación de esbeltez promedio de 113.57. En el caso de colocar tres guaduas individuales sin ningún tipo de unión, el comportamiento de éstas sería totalmente independiente una de otra, ya que la carga última aumenta tres veces y el área también aumentaría tres veces, pero el radio de giro crítico sería el mismo que el de una sola guadua, por lo cual los esfuerzos máximos serían del mismo orden al igual que la relación de esbeltez, sin presentarse algún cambio significativo en el comportamiento estructural, ni incremento alguno en la resistencia que ofrecerían tres elementos de guadua trabajando simultáneamente pero sin algún tipo de unión⁶¹.

Al realizar las uniones, la sección transversal compuesta trabaja como una sola, aumentándose el radio de giro, por ende los esfuerzos máximos se van a incrementar únicamente por la disminución de la relación de esbeltez.

En la tabla No. 19 se muestran los valores promedios obtenidos en los ensayos de las columnas individuales (A) de tres metros de longitud y las columnas compuestas (B1, B2, B3), según cada tipo de unión ensayada, se comparan con los valores teóricos calculados a partir de la teoría de columnas expuesta, tomando como base un módulo de elasticidad de 120000 Kgf/cm². Finalmente se determinó el porcentaje en el cual

⁶¹ Ya que el radio de giro está definido como : $\sqrt{I/A}$, si se asumiera que la inercia (I) y el área (A) de las tres guaduas es igual, entonces el radio de giro para las tres guaduas individuales sin unión es : $r = \sqrt{3I/3A} = \sqrt{I/A}$, por lo cual el radio de giro no se afecta si las guaduas están sin unión.

aumentan los esfuerzos máximos con respecto a la condición en la que no se tuviera ningún tipo de unión en las columnas compuestas por tres elementos de guadua individuales, tanto para los ensayos ($\% \Delta \sigma_{\text{exper}}$) como para los datos teóricos ($\% \Delta \sigma_{\text{teor}}$).

Estos porcentajes se determinan a partir de:

$$\% \Delta \sigma_{\text{exper}} = \frac{\sigma_{\text{teor}(A)} - \sigma_{\text{teor}(Bn)}}{\sigma_{\text{teor}(A)}} * 100$$

$$\% \Delta \sigma_{\text{exper}} = \frac{\sigma_{\text{exper}(A)} - \sigma_{\text{exper}(Bn)}}{\sigma_{\text{exper}(A)}} * 100$$

Donde:

$\sigma_{\text{teor}(A)}$: Esfuerzo máximo promedio teórico para las probetas tipo A (columnas individuales)

$\sigma_{\text{teor}(Bn)}$: Esfuerzo máximo promedio teórico para las probetas tipo B1, B2 y B3 (columnas compuestas)

$\sigma_{\text{exper}(A)}$: Esfuerzo máximo promedio experimental para las probetas tipo A (columnas individuales)

$\sigma_{\text{exper}(Bn)}$: Esfuerzo máximo promedio experimental para las probetas tipo B1, B2 y B3 (columnas compuestas)

Tabla No. 19.

Comparación de esfuerzos teóricos y reales entre columnas individuales y compuestas.

Probetas tipo	L (m)	r (cm)	λ	A (cm ²)	σ_{exper} (Kgf/cm ²)	% $\Delta \sigma_{\text{exper}}$	σ_{teor} (Kgf/cm ²)	% $\Delta \sigma_{\text{teor}}$
A	3.00	2.69	113.57	26.25	150.87	0.00	77	0.00
B1	3.00	4.31	69.60	82.38	181.86	20.55	255	232.83
B2	3.00	4.66	64.50	83.74	241.92	60.35	297	287.59
B3	3.00	5.64	53.22	87.58	280.43	85.88	436	469.18

Por ejemplo, para la columna compuesta tipo B2, en el caso de no tener la unión el esfuerzo máximo experimental esperado sería de 150.87 Kgf/cm², ya que cada guadua trabajaría independientemente, al unir las y hacerlas trabajar conjuntamente el radio de giro es el de una sola sección, lo cual involucra un aumento en los esfuerzos, que para esta columna es de 241.92 Kgf/cm², es decir que los esfuerzos aumentaron 60.35% con respecto al esfuerzo máximo experimental esperado si no se hubiera realizado ninguna unión.

Los resultados obtenidos para las columnas de sección compuesta, se encuentran por debajo de la tendencia de las columnas individuales de tres metros de longitud, esto se

debe a que se tiene una sección transversal de tres guadas, las cuales presentan cada una, propiedades ligeramente diferentes; por ejemplo, que cada una tendrá su propio módulo de elasticidad y por consiguiente al cargarse cada una, se deformarán una más que otra, lo que genera que las cargas se concentren más en una guada, que en otra. Al ocurrir esto, se genera cierto pandeo lo cual, como la sección transversal es grande, va a producir que los extremos giren y el punto de apoyo de las guadas se incline, lo que puede inducir a que no todas las guadas trabajen al máximo, lo que finalmente significa que el esfuerzo calculado con el área total, es menor del que realmente se presenta, ya que el área efectiva sobre la cual actúa la carga, es menor que el área total.

Para comprobar esta teoría se compararon nuevamente los porcentajes teóricos que muestran el aumento de los esfuerzos por el incremento en el radio de giro de la sección compuesta, pero ahora comparándolas con las cargas máximas obtenidas. En la Tabla No. 20 se presenta el valor de cada uno de los porcentajes teóricos en los que debería aumentar la resistencia ($\% \Delta P_{teor}$), comparados con los resultados experimentales obtenidos para cada tipo de unión ($\% \Delta P_{exper}$).

Estos porcentajes se determinan a partir de:

$$\% \Delta P_{teor} = \frac{P_{teor(A)} - P_{teor(Bn)}}{P_{teor(A)}} * 100$$

$$\% \Delta P_{exper} = \frac{P_{máx(A)} - P_{máx(Bn)}}{P_{máx(A)}} * 100$$

Donde:

$P_{teor(A)}$: Carga máxima promedio teórica para las probetas tipo A (columnas individuales)

$P_{teor(Bn)}$: Carga máxima promedio teórica para las probetas tipo B1, B2 y B3 (columnas compuestas)

$P_{máx(A)}$: Carga máxima promedio experimental para las probetas tipo A (columnas individuales)

$P_{máx(Bn)}$: Carga máxima promedio experimental para las probetas tipo B1, B2 y B3 (columnas compuestas)

Tabla No. 20.

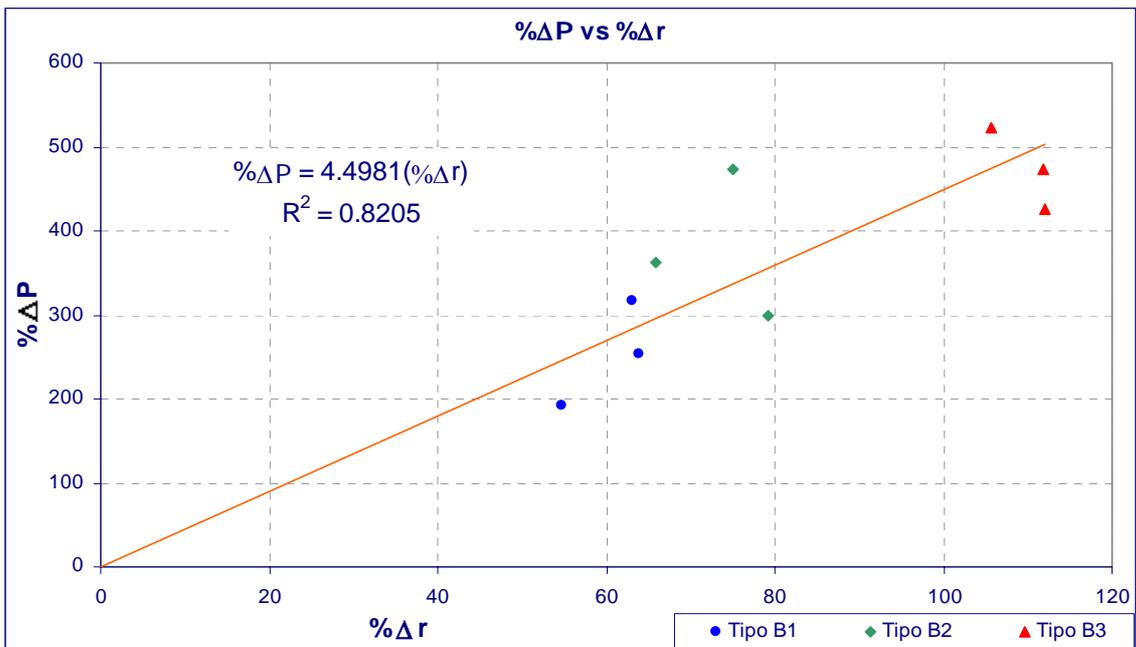
Comparación de cargas máximas teóricas y reales entre columnas individuales y compuestas.

Probetas tipo	L (m)	r (cm)	λ	A (cm ²)	P _{máx} (Kgf)	% Δ P _{exper}	P _{teor} (Kgf)	% Δ P _{teor}
A	3.00	2.69	113.57	26.25	4255	0.00	2008	0.00
B1	3.00	4.31	69.60	82.38	15033	253.35	6683	232.83
B2	3.00	4.66	64.50	83.74	20350	378.31	7783	287.59
B3	3.00	5.64	53.22	87.58	24433	474.29	11429	469.18

Nótese que el aumento en la carga (% Δ P_{exper}) y presenta unos valores aproximados con la teoría(% Δ P_{teor}), y en los tres tipos de uniones, es siempre superior al valor estimado.

Al realizar una gráfica comparando el aumento porcentual del radio de giro (% Δ r), con los datos del aumento porcentual de la carga máxima (% Δ P_{exper}) registrada para cada una de las columnas compuestas, se puede observar una tendencia lineal, con una correlación de 0.8205, que es una buena aproximación.

Hay que tener en cuenta que la relación de esbeltez de las columnas de sección compuesta, tiene en cuenta todo el conjunto, pero también hay que revisar que entre las columnas con uniones, cada uno de los elementos individuales de guadua no presenten una relación de esbeltez mayor a la de toda la columna, de ser así la falla sería en una sola de las guaduas, independientemente de la sección compuesta.



Gráfica No. 8. Relación porcentual entre el radio de giro y las cargas máximas.

Esta esbeltez será igual a la longitud entre uniones (arriostramientos), que es de 1.40 metros, sobre el radio de giro de una sola guadua. En la Tabla No. 21 se compara la relación de esbeltez de las guaduas individuales que componen las sección compuesta (λ_{ind}) con la relación de esbeltez de las columnas compuestas (λ_{comp}).

En cuanto a las columnas compuestas con uniones de 3 tipos diferentes, se pudo garantizar en todos los casos que la sección transversal de las columnas, siempre se comportará como una sola sección. Para la unión tipo 1, la cuerda de polipropileno mantuvo unidas en todo momento del ensayo, cada una de las guaduas que la conformaban, revisando también que el nudo realizado no se soltara o se resbalara, lo cual no sucedió, en cuanto a los cañutos sobre los cuales se apoyaron las uniones de cuerda, en ninguno se presentó la deformación (aplastamiento) de las paredes de guadua de la sección.

Tabla No. 21.
Relaciones de esbeltez de columnas compuestas e individuales.

UNION		Probeta #	r (cm)	λ_{ind}	λ_{comp}
TIPO 1	A	A11	2.50	56.0	72.2
		A17	2.50	56.0	
		A50	2.46	56.9	
	B	A14	2.67	52.4	68.1
		A04	2.61	53.6	
		A5A	2.72	51.5	
	C	A10	2.62	53.4	68.5
		A51	2.70	51.9	
		A61	2.57	54.5	
TIPO 2	A	A31	3.01	46.5	63.8
		A32	2.73	51.3	
		A43	2.82	49.6	
	B	A5B	2.97	47.1	62.3
		A39	2.96	47.3	
		A47	2.95	47.5	
	C	A36	2.99	46.8	67.3
		A22	2.56	54.7	
		A45	2.51	55.8	
TIPO 3	A	A27	3.08	45.5	52.7
		A29	2.92	47.9	
		A40	2.87	48.8	
	B	A7	2.78	50.4	54.3
		A7	2.91	48.1	
		A48	2.76	50.7	
	C	A25	3.13	44.7	52.7
		A13	3.10	45.2	
		A55	2.68	52.2	

En la unión tipo 2, el comportamiento fue similar al de la unión tipo 1, ya que el alambre de acero galvanizado tampoco presentó signos de deformación, ni de deslizamiento en los prensacables. La diferencia más marcada está en los cañutos donde se apoyaba la unión con lámina y alambre de acero galvanizado, ya que aquí aunque no se presentó la deformación (aplastamiento) de las paredes de las guaduas que constituyen la columna, la lámina tiende a hundirse ligeramente en las paredes de la guadua.

En la unión tipo 3, la unión no presentó ningún inconveniente, además que al tener un radio de giro grande, el comportamiento fue como el de una columna corta, y las fallas fueron principalmente por aplastamiento⁶², logrando que la unión trabajara al máximo. En el punto de apoyo de la unión no hubo signos de aplastamiento, únicamente en dos guaduas, se presentaron pequeños hundimientos en la parte donde estaban acomodados los separadores de bambú.

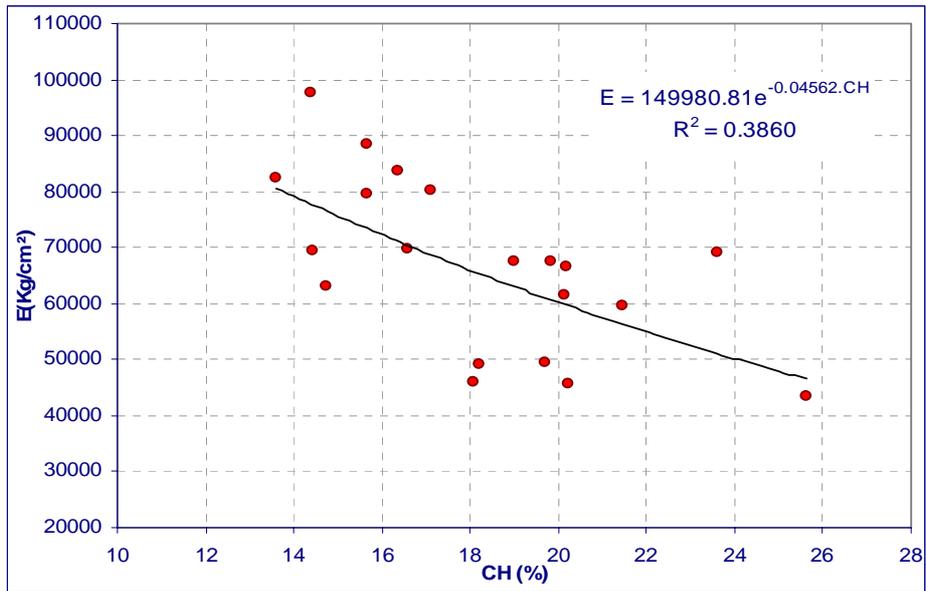
11.4. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y DEL ESFUERZO MÁXIMO (σ_{MAX}) CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

11.4.1. Probetas Cortas

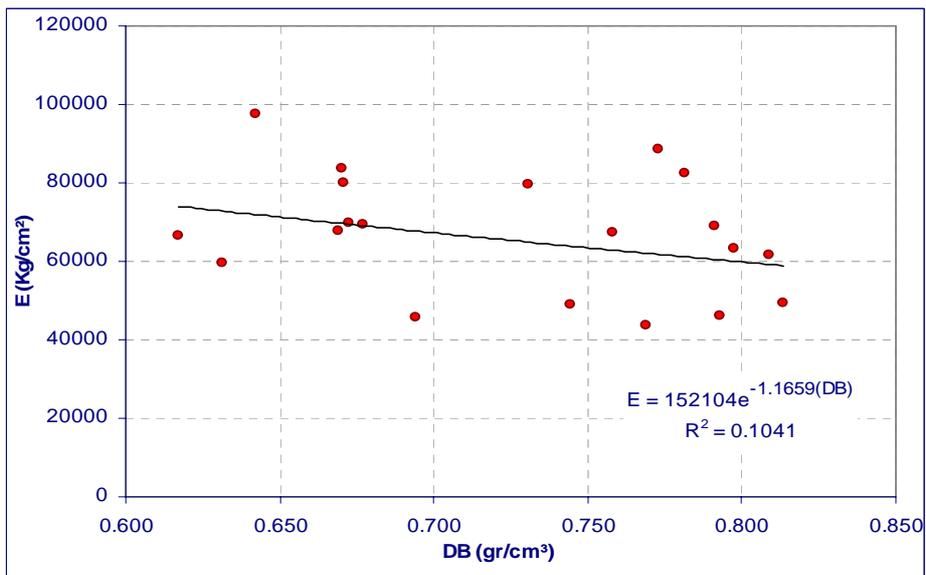
Con los ensayos de las probetas cortas (Probetas Tipo E), se encontraron datos de módulo de elasticidad y de esfuerzos máximos, así mismo con muestras extraídas de las probetas falladas, se realizaron ensayos para hallar los valores de los contenidos de humedad y las densidades básicas.

El módulo de elasticidad es una propiedad característica de cada material, cuyo valor puede estar relacionado con otras características y propiedades del material como son el contenido de humedad y la densidad básica. En las Gráficas No. 9 y 10 se presenta la variación del módulo de elasticidad (E) con respecto al contenido de humedad (CH) y a la densidad básica (DB) respectivamente.

⁶²Ver Anexo B

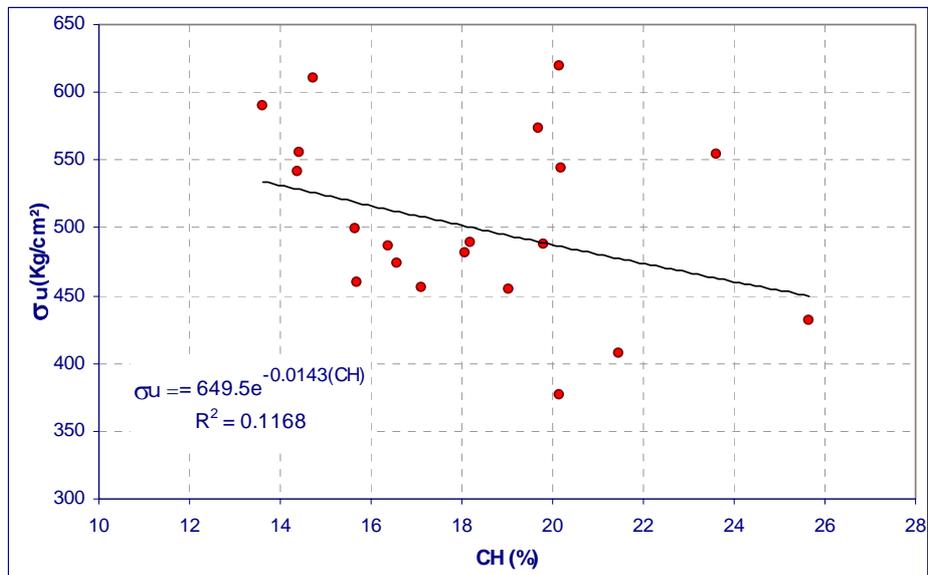


Gráfica No. 9. Relación entre el módulo de elasticidad y el contenido de humedad en probetas cortas.

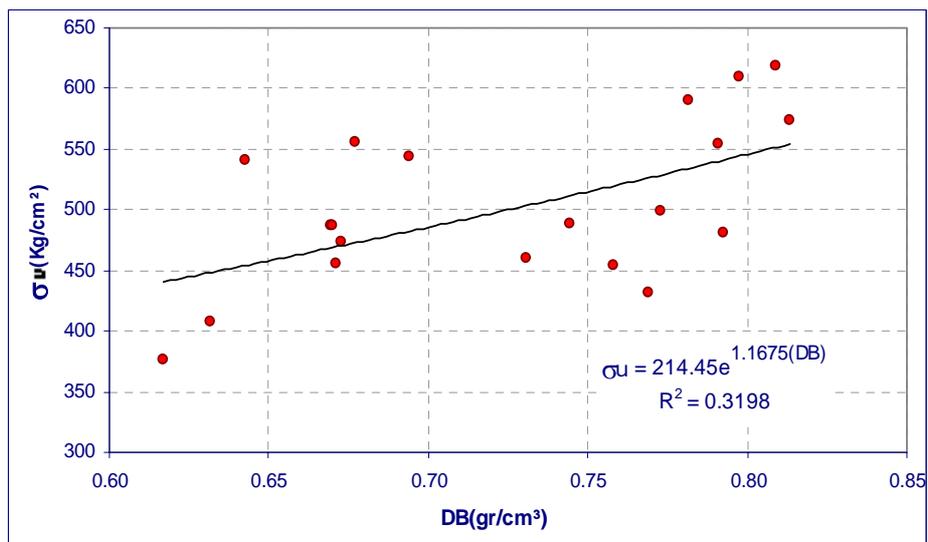


Gráfica No. 10. Relación entre el módulo de elasticidad y la densidad básica en probetas cortas.

El módulo de elasticidad presenta una disminución a medida que el contenido de humedad aumenta, si se compara ésta tendencia con una aproximación, empleando una ecuación exponencial, se obtiene un coeficiente de correlación de 0.3860, el cual es bastante bajo. Respecto a la densidad básica, la dispersión de los datos no permite concluir la influencia de ésta sobre el módulo de elasticidad.



Gráfica No. 11. Relación entre el esfuerzo máximo y el contenido de humedad en probetas cortas.



Gráfica No. 12. Relación entre el esfuerzo máximo y la densidad básica en probetas cortas.

Para el esfuerzo máximo, a pesar de la gran dispersión de los datos (lo que evita que se tenga una buena correlación de los datos), se encontró una tendencia de los esfuerzos máximos a aumentar a medida que la densidad básica de la guadua es mayor.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de la relación entre las propiedades físicas y mecánicas. El contenido de humedad (CH) en % y la densidad básica en gr/cm^3 .

Tabla No. 22
Relación entre propiedades físicas y mecánicas

	Ecuación	R²
E (Kgf/cm²)	$149980.8e^{-0.04562(CH)}$	0.386
	$152104e^{-1.1659(DB)}$	0.104
σ_u (Kgf/cm²)	$649.5e^{-0.0143(CH)}$	0.117
	$214.45e^{1.1675(DB)}$	0.320

11.4.2. Probetas Intermedias Y Largas

En las gráficas No. 13, 14 y 15 se presenta la curva esfuerzo contra relación de esbeltez de los ensayos de las columnas individuales de tres metros de longitud y de las columnas de sección compuesta, para distintos rangos de contenido de humedad (CH), densidad básica (DB) y espesores de las paredes de la guadua respectivamente.

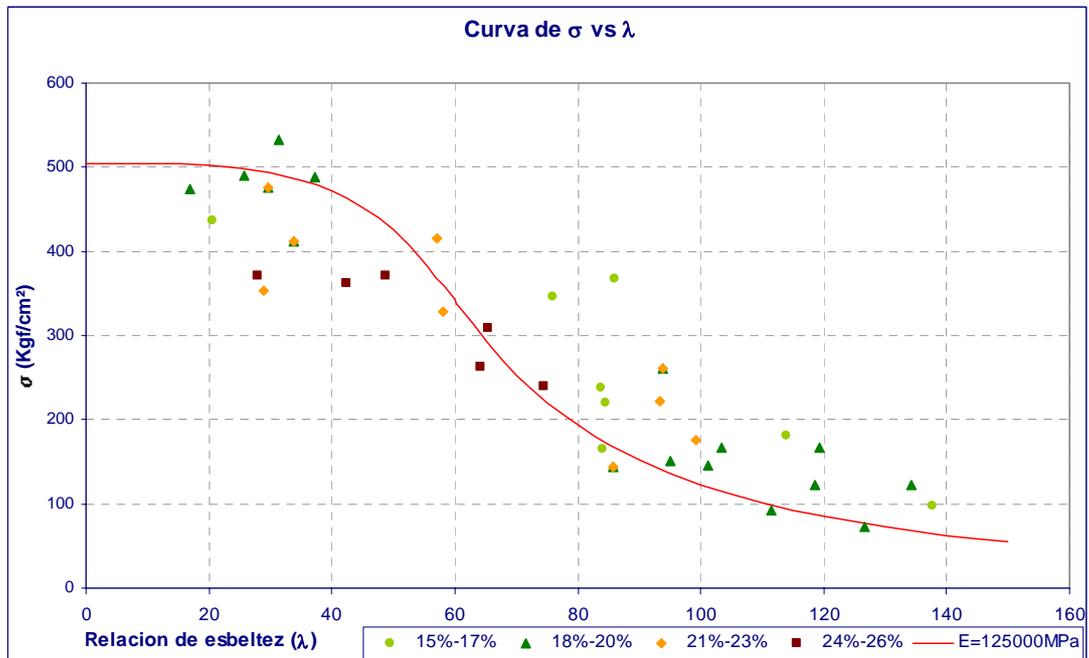
De estas gráficas se observa que tanto para contenido de humedades y densidades básicas diferentes, no hay una relación clara con respecto a los esfuerzos. Con respecto a los espesores de las paredes de guadua, tampoco se encontró ninguna relación, ésto se debe a que la sección transversal no está hecha de un material uniforme, sino que es un material heterogéneo y anisotrópico, menos denso hacia el interior de su sección transversal, por lo que un aumento en el espesor no garantiza que se aumente la porción de material denso, lo que a su vez no significa un aumento en el área resistente.

Al medir la proporción del espesor menos denso (es decir el más blando y localizado en la parte interna del anillo) del anillo de la sección transversal de la guadua, en comparación con el espesor más denso (es decir el de mayor dureza y localizado en la parte externa del anillo), se tiene que en muchas de las secciones transversales ésta proporción es un 50% y un 50% aproximadamente, ésta proporción de tejido denso y menos denso, lleva a concluir que el área de la sección transversal sobre la cual son aplicados los esfuerzos de compresión, son menores a las que teóricamente se suponen, y que por consiguiente, el esfuerzo teórico a resistir, resulta ser mucho mayor, de lo que en realidad es.

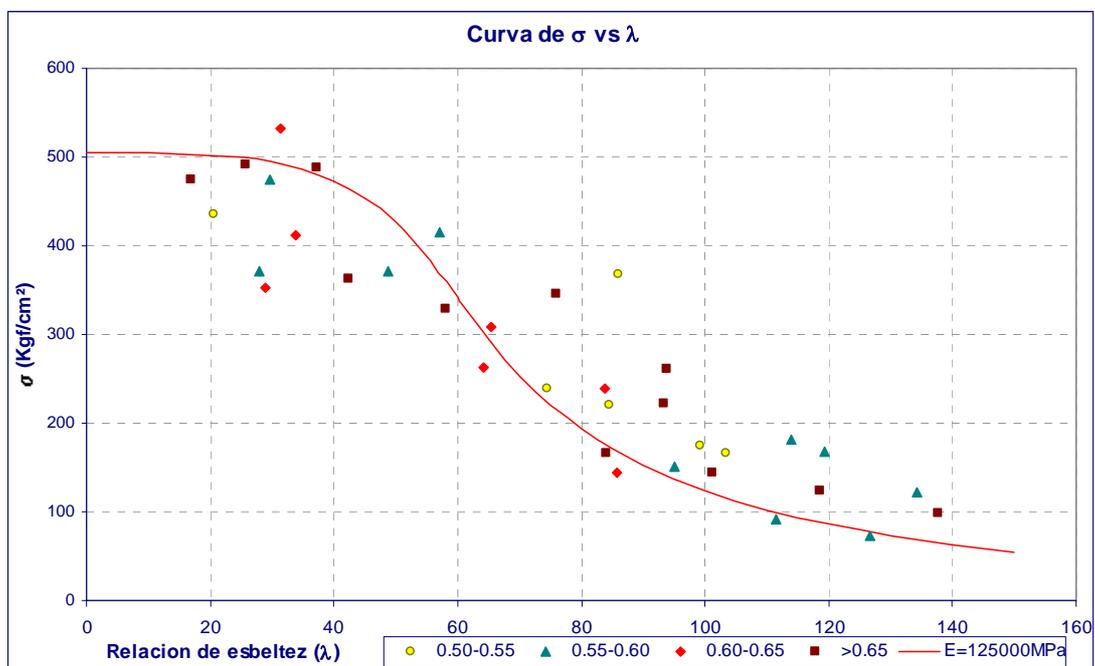


Foto No. 43. *Sección transversal del tallo de guadua*

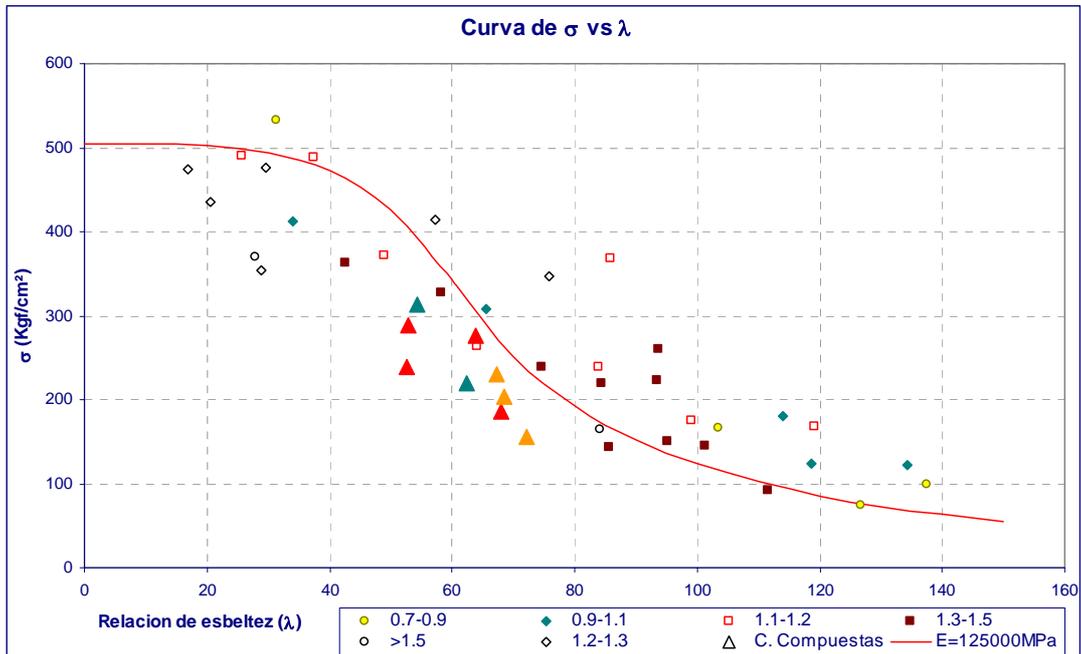
La anotación anterior, tiene incidencia sobre los esfuerzos teóricos calculados para todas las probetas ensayadas en el presente estudio.



Gráfica No. 13. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de contenido de humedad.



Gráfica No. 14. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de densidad básica.



Gráfica No. 15. Curva de esfuerzo contra relación de esbeltez con diferentes rangos de espesores.

11.5. RELACIÓN PESO-COSTO DE LAS UNIONES

El objetivo principal del estudio y análisis detallado de los diferentes tipos de uniones planteados, para formar la sección compuesta de las columnas de guadua armadas con tres guaduas, es llegar a la selección de una unión que por su características como: relación costo/peso, facilidad de armado en obra, durabilidad del material de la unión a lo largo de la vida útil del proyecto, estética, sea la mas favorable al efectuar un análisis comparativo.

Para tener un criterio para la selección de una unión adecuada según los requerimientos, se realizó una comparación de los costos de cada unión con el peso de cada una. En la siguiente tabla se muestra la relación costo/peso para cada una de las uniones.

Como se observa las uniones tipo 1 y 3, aunque son mas fáciles de construir y tiene un peso muy bajo, tienen un costo elevado a comparación de la unión tipo 2, la cual a pesar de ser mas pesada que las anteriores, tiene un costo mucho menor.

Tabla No. 23.
Relación costo/peso de las uniones.

UNION	MATERIALES	PESO	CANTIDAD	PESO TOTAL (Kg)	COSTO TOTAL	\$/Kg
Tipo 1	Cuerda de polipropileno de 3/16"	10 gr/ml	40 ml	0.400	\$ 7,500	\$ 18,750
Tipo 2	Alambre de acero galvanizado 1/8"	112.2 gr/ml	4 ml	0.448	\$ 2,000	
	Presacables de 1/8"	15 gr	4 u	0.060	\$ 1,400	
	Lamina de acero calibre 18 120x5 c	580gr	1 u	0.58	\$ 500	
				1.088	\$ 3,900	\$ 3,585
Tipo 3	Cuerda de polipropileno de 3/16"	10 gr/ml	40 ml	0.400	\$ 7,500	
	Bambues + pegamento	221 gr	1 u	0.221	\$ 2,000	
				0.621	\$ 9,500	\$ 15,298

11.6. VALOR DE DISEÑO POR ESFUERZOS ADMISIBLES A COMPRESIÓN

El esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad utilizado para diseño corresponde al valor del límite de exclusión⁶³ del 5% de los datos obtenidos en los ensayos.

Para el diseño de elementos estructurales se siguieron las pautas planteadas por el Manual de Diseño de Maderas para el Grupo Andino, en el cual se presentan varios factores de seguridad⁶⁴ para determinar el esfuerzo admisible a partir del esfuerzo máximo a compresión (valor correspondiente al 5% del límite de exclusión). En el manual se especifica que para elementos a compresión paralela a la fibra se deben utilizar los siguientes factores:

FS : Factor de servicio y seguridad, mediante el cual se busca exigir el material por debajo del límite de proporcionalidad = 1.6

FDC : Factor de duración de carga = 1.25

$$\phi = \frac{1}{FS * FDC}$$

$$\sigma_{adm} = \phi * \sigma_u$$

Para un esfuerzo máximo de 376,49 Kgf/cm² (esfuerzo para el límite de exclusión del 5% de probetas cortas a compresión) , el esfuerzo admisible a compresión será:

⁶³ JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Op. Cit. P. 7-9

⁶⁴ Ibid P. 7-7

$$\sigma_{adm} = 0.5 * 376.49 = 188.25 \text{ Kgf/cm}^2$$

Para el diseño de las uniones se recomienda seguir el siguiente procedimiento.

Con el esfuerzo admisible a compresión, que puede ser obtenido a partir de ensayos de probetas pequeñas según las normas del INBAR. Se calcula la carga axial máxima para este nivel de esfuerzos, con lo cual se calcula la fuerza lateral para la cual se recomienda tomar como el 10% de la carga máxima a compresión⁶⁵.

Para determinar el número de vueltas que se requieren es necesario definir la resistencia admisible a tensión (F_t) del material a emplear y se calcula con la siguiente expresión:

$$\# \text{ Vueltas} = \frac{F_t}{P_{adm}}$$

⁶⁵ Este porcentaje es para utilizar en columnas largas de 3.00 metros, para longitudes menores de 2.00 metros este factor se puede reducir a un 5%.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para el diseño de elementos estructurales de guadua; se pueden utilizar los valores de esfuerzos admisibles que se muestran en la Tabla No. 24 de acuerdo con los esfuerzos máximos promedio obtenidos de los ensayos realizados con las probetas cortas.

Ensayo	ϕ	σ_{medio} (Kgf/cm ²)	σ_{adm} (Kgf/cm ²)
Compresión	0.5	376	188

Tabla No. 24. Esfuerzos máximos promedio y admisibles para guadua

- Para diseñar elementos de guadua basados en ensayos experimentales, se puede utilizar el coeficiente de reducción de resistencia ϕ para un límite de exclusión del 5%; si no se realizan ensayos experimentales, se pueden utilizar los valores del Tabla No. 24 para efectuar cálculos teóricos.
- La guadua se comporta como un material elastoplástico, las curvas esfuerzo-deformación presentan dos zonas con diferentes comportamientos. Una zona elástica donde las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos y otra plástica, en donde las deformaciones no son proporcionales a los esfuerzos. Con lo cual se puede decir que la guadua angustifolia tiene un comportamiento similar al de la madera.
- Los módulos de elasticidad determinados según el "Laboratory Manual On Testing Methods For Determination of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo" realizadas por el INBAR., fueron menores que los obtenidos a partir de la ecuación de Euler para columnas largas. La causa puede estar en que los primeros ensayos mencionados, las probetas están cortadas de tal forma que no tienen en cuenta los nudos, los cuales en columnas largas involucran cierta rigidez que genera la obtención de módulos de elasticidad mayores; por lo cual

se recomienda realizar estudios que tengan en cuenta los efectos que tiene la presencia del nudo en la determinación del módulo de elasticidad.

- La importancia de unir columnas de guadua radica en que, al tener una sección transversal compuesta, se aumenta el radio de giro de la sección, disminuyendo a su vez la relación de esbeltez, produciéndose un aumento considerable de los esfuerzos. En pocas palabras, al cambiar y aumentar la sección transversal de columnas, se mejoran su capacidad resistente, de tal forma que las cargas máximas se incrementan significativamente.
- Al aumentar los radios de giro, se consigue aumentar proporcionalmente las cargas que se pueden aplicar; para las columnas compuestas que se unen tangencialmente a lo largo de su longitud (Uniones tipo uno y dos), se logra aumentar la carga máxima entre 2.5 y 3.8 veces; para las columnas compuestas que están separadas entre sí por elementos de bambú de 10 cm de longitud, el aumento en la carga máxima será de 4.7 veces en promedio.
- En el estudio se verificó que el módulo de elasticidad es función del contenido de humedad (CH), ya que a menor humedad se presenta un mayor módulo de elasticidad y viceversa. En tanto que el esfuerzo máximo a compresión, es proporcional a la densidad básica, a mayor densidad mayores esfuerzos soportará la guadua.
- Las uniones, cumplieron con el objetivo de toda unión o conexión de un material de construcción: que primero falle el material antes que la unión, es decir, de los tres tipos de uniones ensayadas, ninguna falló. La unión tipo 1 y 3 se diferencian de la tipo 2, porque está última es económicamente más factible de realizar, pero a su vez su fabricación es un poco más compleja y elaborada; adicionalmente a esto, es más pesada que las dos primeras.
- Es importante que todas las muestras a ensayar se tomen de un mismo guadua y de tallos cortados al mismo tiempo, para que la determinación de valores promedios y la comparación de resultados sea significativa. Así mismo, al querer realizar comparaciones con otros estudios, se deben tener claras las condiciones y características del guadua de donde se extrajo el material de

estudio, puesto que no todos los guaduales poseen las mismas condiciones de desarrollo y de manejo que determinan la calidad de material.

- Según el análisis de resultados obtenidos en los ensayos, la característica física de la guadua que más influyó en la resistencia axial a la compresión es el contenido de humedad (CH). Para mejorar las cualidades mecánicas a la compresión axial, es recomendable que al momento del corte, se busque la época en que la guadua posea el menor contenido de humedad posible y darle un tratamiento de curado y secado apropiado.
- La diferencia entre los esfuerzos máximos teóricos y experimentales, así como la medición de una zona menos densa dentro del anillo de la sección transversal de la guadua, llevan a pensar que el material presumiblemente posee dos tipos de resistencia una hacia el interior de la sección y otra hacia el exterior siendo menor la del interior, razón por la cual, el área efectiva para calcular los esfuerzos se vería afectada. Este punto es importante tenerlo en cuenta en análisis y estudios posteriores ya que se puede considerar que el material está formado por dos capas, llevando esto a un replanteo de los ensayos y análisis para guadua.
- Para los ensayos realizados, los cañutos sobre los cuales fueron colocadas las uniones no fueron rellenos y no se presentaron señales de deformación (hundimiento) de los cañutos, lo cual indica que no es necesario rellenar los cañutos con mortero u otro tipo de relleno, ya que esto implicaría un aumento de peso innecesario.
- Para emplear la guadua como material de construcción de columnas, no se deben utilizar guaduas verdes o menores de 3 años, o tallos que se encuentren atacados por insectos, que presenten fisuras o grietas verticales o cortes horizontales superficiales producidos accidentalmente con un machete, ni tampoco se deben emplear guaduas ya florecidas. En general, se recomienda utilizar guaduas en buen estado y que sean, en lo posible, rectas.
- En columnas de guadua se recomienda un secado natural a la sombra, tratamiento con el cual se produce un aumento en las propiedades mecánicas a

compresión por la disminución del contenido de humedad y se evita la formación de fisuras longitudinales.

- Para la fabricación de las uniones con amarre de cuerda de polipropileno, además de seguir las recomendaciones del fabricante, es importante tener en cuenta, que al momento de realizar la unión, los elementos de guadua a amarrar no pueden estar verdes, pues al momento de secarse se contraen, dejando flojos los amarres. Si se emplea otro tipo de cuerda, se debe evitar el uso de cuerdas elásticas que con el tiempo se estiran y pierden el tensionamiento o cuerdas en mal estado o muy delgadas. Se recomienda emplear amarres de alambre o cuerdas de fibras vegetales, sintéticas o de cuero.
- Si se decide emplear en una construcción las columnas armadas por tres guaduas con cualquiera de los tres tipos de unión, se recomienda que las tres guaduas tanto en el extremo inferior (apoyo de la columna) como en el superior (apoyo de una viga o placa), queden provistas de un nudo, para evitar posibles astillamientos o aplastamiento del entrenudo. Adicionalmente, como suele recomendarlo Simón Vélez, se debe aislar la base de la columna del suelo mediante una base de concreto o mortero que sirva como zapata de apoyo para evitar cualquier contacto con la humedad que pueda deteriorar el material.
- El montaje para realizar los diferentes ensayos, debe ser analizado con cuidado, ya que la forma de aplicación de la carga sobre el elemento de columna, incide considerablemente en los resultados finales, y no simulan de forma real las sollicitaciones del elemento.
- Conociendo las diferencias entre las variedades y las formas de guadua existentes en el territorio colombiano, es importante considerar la incidencia del desarrollo de la mata dentro del hábitat de cultivo, la resistencia que alcanza con la edad, su anatomía, morfología y un sin número más de variables que la afectan en sus propiedades como material de construcción, evidenciando además que se trata de un material anisotrópico y heterogéneo, para el cual la teoría de la resistencia de materiales no es completamente aplicable, por lo que no será inmediatamente necesario tratar de determinar módulos, coeficientes, etc. Por lo tanto el estudio de la guadua como material de construcción, no se

debe enfocar tan detalladamente en la anatomía de la misma como en otro tipo de estudios (agronomía, biología, forestal), se hace bastante con procurar precisar los esfuerzos admisibles, con los que es posible el diseño acertado.

- Consideramos este estudio, un aporte a los sectores de más bajos recursos de nuestras regiones rurales y suburbanas, pues se rescata tanto un material tradicional y autóctono, así como tipos de uniones basadas en soluciones artesanales, propias de nuestros constructores campesinos y empíricos, las cuales se estudiaron para dar alternativas económicamente y constructivamente factibles, que contribuyan al mejoramiento de las condiciones de vida de quienes lo necesitan.
- La construcción en guadua es una cultura que promete en nuestro país, con las actuales investigaciones y las futuras, se podrán establecer parámetros de diseño que sean aceptados y aplicados por el gremio de la Ingeniería y la Arquitectura. Es importante que se sigan realizando estudios en el tema, ya que éste es un material que apenas se está desarrollando y necesita de sustentos teóricos para incursionar definitivamente en el campo del diseño y la construcción.
- La cultura de la guadua no se centra únicamente en la utilización de ésta como material de construcción, sino en la cultura y conciencia de un desarrollo sostenible, que garantice la propagación y conservación de los guaduales como riqueza ambiental y natural de nuestras regiones, así como materia prima de la construcción que debe ser empleada racionalmente.

13. BIBLIOGRAFÍA

AIS. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Tomo II. Bogotá, 2002.

AIS. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. Manual de Construcción Sismo Resistente de viviendas en Bahareque encementado, 2001. Publicación con el auspicio de la Fundación Corona.

AZUOLA GUERRA, Ramón. La Guadua. Vol. 1, #3 En : Revista Anales de Ingeniería. Octubre, 1887.

BONILLA, Carlos F. Comparación de la resistencia de la guadua a esfuerzos de compresión teniendo en cuenta la época de corte. Manizales, 2001. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

C.R.Q.-CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO. CENTRO NACIONAL PARA EL ESTUDIO DEL BAMBÚ-GUADUA. Hojas informativas No. 1 al 15.

CARVAJAL, William N., ORTEGÓN, William O. y ROMERO, Carlos J.. Elementos estructurales en bambú. Bogotá, 1981. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil; p91.

GERE, James y TIMOSHENKO, Stephen. Mecánica de Materiales. Editorial Iberoamérica. México. 1986.

GIRALDO HERRERA. Edgar Y SABOGAL OSPINA. Aureliano. Una alternativa sostenible: La Guadua. Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q., 1999.

GIRALDO HERRERA, Edgar Y SABOGAL OSPINA, Aureliano. "La Guadua Angustifolia KUNTH EN COLOMBIA". Corporación Autónoma Regional de Quindío. C.R.Q. Subdirección de Recursos Naturales y educación ambiental. Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua., 1999.

GIRALDO HERRERA, Edgar Y SABOGAL OSPINA, Aureliano. La Guadua y las fuentes de agua, su silvicultura y cultivo. Corporación Autónoma Regional de Quindío. C.R.Q. Subdirección de Recursos Naturales y educación ambiental. Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua., 1998. 10 p.

GÓMEZ, Carlos y RUBIO, Fabio. Esfuerzos de trabajo para elementos estructurales en guadua (Bambusa Guadua). Bogotá 1990. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería Civil.

GONZALEZ, Eugenia y DIAZ, John. Propiedades físicas y mecánicas de la guadua. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

GUTIERREZ G, Jorge A. Comportamiento estructural y resistencia sísmica de las viviendas de bambú. En : CONGRESO MUNDIAL DE BAMBU / GUADUA. (1º: 1992 : Pereira) . memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992.

HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Bambú, su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Cali, Colombia. Estudios Técnicos Colombianos-Editores, 1974. 318p.

_____ Manual de Construcción con Bambú. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú Madera, Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos-Editores, 1981. 71p.

_____ Nuevas Técnicas de Construcción con Bambú. Construcción rural – 1. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos-Editores, 1978. 137p.

ISHLER, Michael y BECKER, Roy. Steel tips based on the 1994 UBC. Estructural steel educational council. Technical information and product service. Diciembre 1996.

JASSEN, Jules. Building with Bamboo. Intermediate Technology Publications. London, 1995.

JASSEN, Jules. The Mechanical Properties of Bamboo used in Construction. En: Bamboo Research in Asia. Giles and Amy Choninard. Singapur, 1980.

KAMBE, Frederick A, ZINK-SHARP, Audrey. Analysis of Calcutta Bamboo for Structural Composite Materials. Dissertation submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of requirements for the degree of : DOCTOR OF PHILOSOPHY in Wood Science and Forest Products. Blacksburg, Virginia, August 2000.

LASTRA, J.A. Generalidades sobre Tecnología de Maderas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes. Dpto. de Construcción. Bogotá.

LONDOÑO PAVA, Ximena. Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo. En: CESPEDESIA. Vol. 19, Nos. 62-63 (enero – diciembre 1992). Cali, Colombia. P.87-137.

_____ Estudio Botánico, ecológico, silvicultural y económico-industrial de las Bambusoideae de Colombia. En : CESPEDESIA, Vol. XVII, No. 59 (julio - diciembre 1990). Cali, Colombia. P. 51-73.

_____ Estudio Botánico, ecológico, silvicultural y económico-industrial de las Bambusoideae de Colombia. En : CESPEDESIA, Vol. XVIII, No. 60 (enero - julio 1991). Cali, Colombia. P. 111-115.

_____ Taxonomía de los bambúes del nuevo mundo con énfasis en el género guadua. En : CONGRESO MUNDIAL DE BAMBÚ / GUADUA. (1º: 1992: Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992.

LÓPEZ, Luis Felipe y SILVA, Mario Felipe. Comportamiento sismorresistente de estructuras en Bahareque. Manizales, 2000. trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería.

MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO. Editado por la Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima – Perú, 1984.

MARTÍN, José Virgilio y MATEUS, Lelio Rafael. Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla. Bogotá, 1981. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola; p.104.

MARTÍNEZ CÁCERES, Dixon Emmanuel. Puentes en do mayor (tesis de grado). En : CONGRESO MUNDIAL DE BAMBÚ / GUADUA. (1° : 1992 : Pereira.). memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992.

PRIETO, Edwin y SANCHEZ, Jorge H. Comportamiento de la guadua Angustifolia sometida a flexión. Bogotá, 2001. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

ROBLEDO CASTILLO, Jorge Enrique. Un Siglo de Bahareque en el Antioqueño. En : CONGRESO MUNDIAL DE BAMBÚ / GUADUA. (1° : 1992 : Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992.

SALAZAR CONTRERAS, Jaime y DÍAZ, Gustavo. Inmunización de la Guadua. En: Ingeniería e Investigación. Especial de Ingeniería Civil. No. 38 (diciembre 1997). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Santafé de Bogotá.

SEELY, F.B. Resistencia de materiales. Editorial Hispanoamericana. México. 1954.

SILVA, Mario F. y LOPEZ, Luis F. Comportamiento sismo-resistente de estructuras en bahareque. Manizales, 2000. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

VALENCIA CLEMENT, Gabriel. Estructuras de acero. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá. 1997.