

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE
ESTRUCTURAS EN GUADUA**

DANIEL PALACIOS LÓPEZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2009**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE
ESTRUCTURAS EN GUADUA**

DANIEL PALACIOS LÓPEZ

**Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO DE DISEÑO DE PRODUCTO**

Asesor:

CARLOS EDUARDO LÓPEZ ZAPATA

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2009**

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Medellín 24 de Abril de 2009

Este es un trabajo dedicado al Universo que en su fluir me provocó a amar ésta maravillosa planta (El Bambú) y brindó los medios para saciar la sed de conocimiento y desarrollo en todo lo que respecta a ella, y de paso me dio felicidad.

Daniel Palacios López

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad EAFIT, a su programa de Ingeniería de Diseño de Producto y a sus docentes por ayudarme a ampliar mis capacidades cognitivas y formarme en tenacidad. A los laboratorios de la misma Universidad y en especial a Roberto Ignacio Hernández Espinal por su apoyo para el trabajo.

A mi familia por entender y apoyar mis decisiones y en especial a mi abuela Matilde por compartir conmigo sus vivencias del mundo de la guadua.

A mis amigos cercanos Ailyn Ceballos, Nicolas Katzman y en especial a Camilo Ruiz por ayudarme tanto con el prototipo.

A mi asesor del proyecto Carlos López por apoyar la causa y brindar sus opiniones y conocimientos con pasión.

A Jairo Jiménez del Centro Nacional de Estudio para el Bambú Guadua, a Jörg Stamm y Victor, de Ecobamboo, a Jorge Augusto Montoya, Juan Carlos Camargo, Tito Morales, Jorge Hugo García, Gustavo Cardona y John Jairo Ocampo de la Universidad Tecnológica de Pereira, a Álvaro y Antonio de Colguadua, a Raumar Gómez de Induguadua, a Gustavo de Ecoguadua, y a Don Ever el guaduo, gracias por compartir sus conocimientos en lo referente a la guadua.

A Ricardo Chabela en Ecobamboo, a Luz Patricia Hernández, Julián Valencia, Andrea, Lorena, Beti, Damián Tonon, Ignacio Novoa, Alex Pacheco, Isaac, Diana Melisa Figueroa y Pilar Duque en el diplomado GIGa en Pereira, que me acompañaron porque sin sus sonrisas no hubiera sido tan agradable la estadía en dichos lugares.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	26
<u>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO</u>	<u>27</u>
1.1 ANTECEDENTES	28
1.2 JUSTIFICACIÓN	33
1.3 OBJETIVOS	37
1.3.1 Objetivo general	37
1.3.2 Objetivos específicos	37
1.4 ALCANCE	38
1.5 METODOLOGÍA	39
<u>2. INVESTIGACIONES PREVIAS</u>	<u>40</u>
2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GUADUA	41
2.1.1 Algunos factores que influyen las propiedades mecánicas del bambú.	42
• El clima.	42
• El suelo.	43
• La inclinación del terreno.	43
• La edad del culmo.	44

• El contenido de humedad.	44
• Anatomía y morfología.	44
2.1.2 Resultados de propiedades mecánicas que se tendrán en cuenta para el presente proyecto.	47
2.1.3 La guadua en comparación con otros materiales.	48
2.1.4 La durabilidad de la guadua.	50
• La edad del culmo.	50
• Avinagrado (Curado en mata).	51
• Preservación química.	51
• Secado.	52
• Protección por diseño.	53
2.1.5 Conclusiones y recomendaciones sobre las propiedades físicas de la guadua.	54
2.2 SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN EN GUADUA EXISTENTES	55
2.2.1 Estado del arte de la construcción en guadua.	55
2.2.2 Conclusiones de las construcciones en guadua.	74
2.3 GUADUA COMERCIAL	75
2.3.1 Partes comerciales del culmo.	75
2.3.2 Empresas comercializadoras en Colombia y sus productos	76
2.3.3 Conclusiones sobre la guadua comercial.	79

3. DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN EN GUADUA	80
3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO (PDS) DEL DISEÑO CONSTRUCTIVO	81
3.2 ALTERNATIVAS INICIALES	85
3.2.1 Alternativas que utilizan a la guadua en su estado natural (rolliza).	85
3.2.2 Alternativas que utilizan a la guadua en otro estado (laminada, en latas u otra).	85
3.2.3 Evaluación de las alternativas iniciales.	86
3.3 ALTERNATIVA A DESARROLLAR	87
3.3.1 Alternativas de diseño de enlace.	88
3.3.2 Evaluación de las alternativas de diseño de enlace.	95
3.3.3 Alternativas de diseño de nodo.	96
3.3.4 Evaluación de las alternativas de diseño de nodo.	99
3.4 DISEÑO DE DETALLE, ANÁLISIS COMPUTACIONAL Y DE LABORATORIO	100
3.4.1 Análisis de elementos finitos inicial.	101
3.4.2 Pruebas de laboratorio iniciales.	102
3.4.3 Recomendaciones a partir de las pruebas.	109
3.5 DISEÑO DE DETALLE	110
3.5.1 Diseño definitivo.	110

3.5.2 Diseño para X.	112
3.5.3 Pruebas sobre los elementos del prototipo.	115
3.5.4 Elementos constructivos especiales.	119
3.5.5 Diseño de estructuras.	119
3.5.6 Diseño de sistemas complementarios.	120
<u>4. MATERIALIZACIÓN DEL PROTOTIPO</u>	<u>123</u>
<u>5. ANÁLISIS DEL NUEVO SISTEMA</u>	<u>126</u>
5.1 ANÁLISIS DE TANGIBLES	127
5.1.1 Resistencia.	127
5.1.2 Costos.	127
5.1.3 Peso.	129
5.1.4 Tiempos.	130
5.2 ANÁLISIS DE INTANGIBLES	131
5.2.1 Estética.	131
5.2.2 Versatilidad.	131
5.2.3 Medio Ambiente.	132
<u>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>133</u>
BIBLIOGRAFÍA	137
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	141
ANEXOS	143

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1.1 Distribución del bambú en el mundo	29
Figura 1.2 Construcciones en guadua en la ciudad de Manizales	31
Figura 1.3 Proyectos arquitectónicos en guadua. Jörg Stamm y Simón Vélez.	32
Figura 1.4 Proyectos arquitectónicos en guadua. Fundeguada.	32
Figura 1.5 Proyectos en guadua en fase de construcción	33
Figura 1.6 Usos comunes de la guadua como material desechable	36
Figura 2.1.1 Culmos de guadua para aprovechamiento	41
Figura 2.1.2 Culmos de guadua seccionados	44
Figura 2.1.3 Morfología básica de la guadua	45
Figura 2.1.4 Estructura axial y transversal de la guadua	46
Figura 2.1.5 Tanques para inmunización de la guadua	52
Figura 2.1.6 Secado de la guadua	52
Figura 2.2.1 Casas tradicionales en guadua	55
Figura 2.2.2 Detalles de casas tradicionales en guadua	55
Figura 2.2.3 Entalladuras comunes para piezas en guadua	56
Figura 2.2.4 Uniones comunes en guadua	56
Figura 2.2.5 Algunas herramientas que se utilizan en la construcción en guadua	57
Figura 2.2.6 Casa en guadua en etapa de construcción	58
Figura 2.2.7 Construcciones en guadua en La Granja de la Mamá Lulú	58
Figura 2.2.8 Algunas casas que ofrece Bamboo Technologies	59
Figura 2.2.9 Algunas uniones de Bamboo Technologies	59
Figura 2.2.10 Proceso de construcción, Bamboo Technologies	59
Figura 2.2.11 Unión con mortero de concreto y barras axiales	60
Figura 2.2.12 Unión con mortero de concreto y pernos pasantes	62
Figura 2.2.13 Peajes Autopistas del Café	63
Figura 2.2.14 Estructuras con unión Conbam	64
Figura 2.2.15 Unión diseñada por C.H. Duff en 1941	64
Figura 2.2.16 Fabricación de la unión Conbam	64

Figura 2.2.17 Diseños de Bamboo Space. Por Tim Obermann	66
Figura 2.2.18 Pabellón Mariposa. Por Tim Obermann	66
Figura 2.2.19 Prototipo de la unión de Bamboo Space	66
Figura 2.2.20 Otros tipos de unión según el autor	68
Figura 2.2.21 Unión cónica abrazando con cable metálico	68
Figura 2.2.22 Cercha Warren con latas de bambú	69
Figura 2.2.23 Cimientos de concreto reforzado con guadua. Guayaquil, Ecuador	69
Figura 2.2.24 Casas fabricadas con paneles prefabricados en guadua rolliza y esterilla	70
Figura 2.2.25 Vigas laminadas de guadua	70
Figura 2.2.26 Domos de madera laminada de bambú	71
Figura 2.2.27 Guadua arqueada crecida en formaleta	71
Figura 2.2.28 Cercha Warren con guaduas rollizas y miembro crecido en formaleta	71
Figura 2.2.29 Bambú de sección cuadrada crecido en formaleta	72
Figura 2.2.30 Diseño de unión de Mehran Gharaati y Andi Struga	72
Figura 2.2.31 Algunas uniones diseñadas en la Universidad Nacional de Colombia	73
Figura 2.3.1 Partes comerciales del culmo de la guadua	76
Figura 2.3.2 Algunos productos derivados de la guadua	77
Figura 2.3.3 Fotografías de algunas empresas comercializadoras de guadua en Colombia	78
Figura 3.1 Diagrama de elementos a diseñar	88
Figura 3.2 Terminal tipo Contracción Verde	89
Figura 3.3 Terminal tipo Universal Apriete	90
Figura 3.4 Terminal tipo Universal Abrazadera	91
Figura 3.5 Terminales tipo Mecanismo “Diafragma expansible”	92
Figura 3.6 Terminal tipo Mecanismo “Tijera”	92
Figura 3.7 Terminal tipo Mecanismo “Apriete”	93
Figura 3.8 Terminal tipo Mecanismo “Cuña”	93
Figura 3.9 Enlaces Híbridos con elemento tensor adicional	94
Figura 3.10 Nodo articulado tipo Rótula	96
Figura 3.11 Nodo tipo Poliedro de Platinas	97

Figura 3.12 Nodo articulado tipo Cardán	97
Figura 3.13 Nodo tipo Pasador en Tubo	98
Figura 3.14 Nodo tipo Pasador en Platina	98
Figura 3.15 Terminales de Enlace Híbrido para Nodo Pasador en Platina	100
Figura 3.16 Análisis CAE de las piezas sometidas a compresión	101
Figura 3.17 Prueba de compresión en la terminal de disco con platina sencilla	103
Figura 3.18 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal de disco con platina sencilla	103
Figura 3.19 Terminal de disco con platina sencilla deformada como resultado de la prueba de compresión	103
Figura 3.20 Prueba de compresión en la terminal de disco con platina reforzada	104
Figura 3.21 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal de disco con platina reforzada	105
Figura 3.22 Terminal de disco con platina reforzada deformada como resultado de la prueba de compresión	106
Figura 3.23 Terminal tipo Universal Abrazadera para ensayo	107
Figura 3.24 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal tipo Universal Abrazadera	108
Figura 3.25 Diseño de terminal para prototipo	110
Figura 3.26 Nodo para estructuras espaciales y un tetraedro formado con éste	111
Figura 3.27 Nodo para estructuras monocapa y una pirámide pentagonal formado con éste	111
Figura 3.28 Piezas del Nodo para estructuras monocapa	112
Figura 3.29 Nodo modificado para reducir su número de partes	113
Figura 3.30 Primer momento de ensamble: Manufactura	113
Figura 3.31 Segundo momento de ensamble: Prefabricación	114
Figura 3.32 Tercer momento de ensamble: La construcción	114
Figura 3.33 Momento de fallo y pieza deformada en la prueba de compresión de la terminal prototipo guadua de diámetro menor	115
Figura 3.34 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal prototipo guadua de diámetro mayor	116
Figura 3.35 Momento de fallo en la prueba de compresión del nodo monocapa	117
Figura 3.36 Columna compuesta por 6 guaduas de 6 metros cada una	119
Figura 3.37 Ejemplo de Viga y Cubierta formada a partir de tetraedros	119
Figura 3.38 Ejemplo de Domo formado a partir de pirámides pentagonales	120

Figura 3.39 Sistema de cerramiento en vidrio tipo araña para fachada	121
Figura 3.40 Sistema de cerramiento en vidrio tipo tornillo para fachada o cubierta	121
Figura 3.41 Sistema de cerramiento en vidrio tipo snap-fit para fachada o cubierta	121
Figura 3.42 Sistema para losa	122
Figura 4.1 Mesa de corte por plasma CNC	123
Figura 4.2 Enlaces y nodos fabricados	124
Figura 4.3 Prototipo: Estructura en forma de tetraedro irregular	125
Figura 4.4 Prototipo: Estructura en forma de pirámide pentagonal	125
Figura A.1 Casa Molecule. Arq. Matías M. Konstandt	143
Figura A.2 Sistema de encastre. Arq. Matías M. Konstandt	144
Figura A.3 Construcciones realizadas con el sistema SteelBuilt	145
Figura A.4 Construcciones realizadas con el sistema SteelBuilt	145
Figura A.5 Construcciones realizadas con el sistema Louisiana Pacific	146
Figura A.6 Construcciones realizadas con el sistema Louisiana Pacific	146
Figura A.7 Sistema <i>Structura</i> de Hispalyt	147
Figura A.8 Mampostería	148
Figura A.9 Construcciones en mampostería	149
Figura A.10 Construcción con chapa de encofrar	150
Figura A.11 Construcción con drywall	151
Figura A.12 Construcción con encofrados	152
Figura A.13 Construcciones realizadas por Forsa	153
Figura A.14 Construcciones en realización. Sistema Forsa	153
Figura A.15 Construcciones con cerramientos Kalzip	154
Figura A.16 Construcciones con cerramientos Kalzip	154
Figura A.17 Sistema MERO, Proyectos alrededor del mundo	155
Figura A.18 Sistemas de estructura de la empresa Novum Structures	156
Figura A.19 Casas prefabricadas en concreto	157
Figura A.20 Muros de tapia	158
Figura A.21 Varios tipos de tapia	159
Figura A.22 Casas fabricadas en bahareque	159
Figura A.23 Construcción de casas en bahareque, Unidad Residencial La Aldea. Municipio de La Estrella	160

Figura C.1 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1	169
Figura C.2 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1	170
Figura C.3 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1	171
Figura C.4 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Deformación-Deformación4	172
Figura C.5 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Tensiones-Tensiones1	176
Figura C.6 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Desplazamientos-Desplazamientos1	177
Figura C.7 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1	178
Figura C.8 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Deformación-Deformación2	179

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Porcentaje de tejidos en la Guadua angustifolia	45
Tabla 2. Resistencia mecánica de la guadua: Valores que se tendrán en cuenta para el presente proyecto	47
Tabla 3. La guadua en comparación con otros materiales	48
Tabla 4. Áreas de guaduales naturales y establecidos en Colombia	75
Tabla 5. Especificaciones de diseño de producto (PDS)	81
Tabla 6. Evaluación de las alternativas iniciales de diseño	86
Tabla 7. Evaluación de las alternativas de diseño de Enlace	95
Tabla 8. Evaluación de las alternativas de diseño de Nodo	99
Tabla 9. Costo de una Terminal	128
Tabla 10. Costo de un Nodo	128
Tabla 11. Cotización pirámide pentagonal con guaduas de 3m	128
Tabla 12. Resistencia mecánica de la guadua: Edgar Giraldo Herrera y Aureliano Sabogal Ospina. Una alternativa sostenible: la Guadua. Tercera Edición actualizada noviembre de 2007	162
Tabla 13. Resistencia mecánica de la guadua: Eugenia Gonzáles y John Fernando Díaz. Parámetros de diseño para construir en guadua	163
Tabla 14. Resistencia mecánica de la guadua: Pruebas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Bogotá	163
Tabla 15. Resistencia mecánica de la guadua: Instituto Alemán de Prueba de Materiales de Construcción Civil, Stuttgart, para el pabellón de ZERI en noviembre de 1999. Construido con Guadua angustifolia (Biotipo macana)	164
Tabla 16. Resistencia mecánica de la guadua: Compilación realizada por Bamboo Space de varios autores	164
Tabla 17. Fuerzas admisibles a compresión en guaduas individuales	188
Tabla 18. Fuerzas admisibles a compresión en columnas compuestas por 6 guaduas separadas a 180mm del centro	189
Tabla 19. Valores de la constante k según la condición de apoyo de la columna	190

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág
Gráfico 1. Área total en guadua versus Área aprovechada	78
Gráfico 2. Carga vs. Desplazamiento de la Prueba 1	104
Gráfico 3. Carga vs. Desplazamiento de la prueba 2	106
Gráfico 4. Carga vs. Desplazamiento de la prueba 3	108
Gráfico 5. Carga vs. Desplazamiento de la Prueba 4	116
Gráfico 6. Carga vs. Desplazamiento de la Prueba 5	117
Gráfico 7. Carga vs. Desplazamiento de la Prueba 6	118

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A. SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN REPRESENTATIVOS	143
ANEXO B. ALGUNAS INVESTIGACIONES YA REALIZADAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA	162
ANEXO C. INFORMES DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	166
ANEXO D. PLANOS DE PROBETAS Y PIEZAS DEL PROTOTIPO	180
ANEXO E. CÁLCULO DE ELEMENTOS A COMPRESIÓN CONSIDERANDO EL PANDEO	188

ABREVIATURAS

A: área de la sección transversal

CH: contenido de humedad

cm: centímetros

": pulgadas

CV: coeficiente de variación

DB: densidad básica

de: diámetro externo

di: diámetro interno

E: módulo de elasticidad

f_{adm} : fuerza admisible

g: gramos

Ha: hectáreas

I: inercia de la sección transversal

i: radio de giro

k: constante de condición de apoyo de la columna

Kg: kilogramos

L: longitud

l_{ef} : longitud efectiva

λ : relación de esbeltez

mm: milímetros

m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar

N: newtons

P_{cr} : carga crítica

σ_{adm} : esfuerzo admisible a compresión

σ_{ip} : esfuerzo en el límite de proporcionalidad

σ_{max} : esfuerzo máximo a compresión

GLOSARIO

ANATOMÍA: ciencia que estudia las macro estructuras anatómicas de los seres vivos.

ALERO: parte de la cubierta (techo) de los edificios que sobresale de la fachada.

BAHAREQUE: sistema de construcción que consiste en paredes con un entramado de guadua o madera rellena con barro. El bahareque encementado constituye una modificación a éste donde el entramado se revoca con mortero.

BASA: en arquitectura se llama así a la parte inferior de una columna y en biología a la parte inferior de un miembro, aunque comercialmente se le llama así al segundo cuarto del culmo de guadua (usualmente la sección comprendida entre los 3 y 7 metros desde el suelo).

BURRO (PERCHA): estructura, generalmente hecha de guadua, que tiene como fin ubicar guaduas verticalmente para su secado al aire libre. Ver imagen de la izquierda en la figura 2.1.6.

CAD: por sus siglas en inglés Computer-aided design (Diseño asistido por computador)

CAE: por sus siglas en inglés Computer-aided engineering (Ingeniería asistida por computador)

CAM: por sus siglas en inglés Computer-aided manufacturing (Manufactura asistida por computador)

CARGAS ESTRUCTURALES: constituyen todas las cargas que afectan a la construcción, incluye cargas vivas, cargas muertas, cargas sísmicas, cargas eólicas, cargas por presión lateral de tierras o agua y efectos de temperatura.

CARGAS MUERTAS: cargas que actúan durante toda la vida de la construcción, incluyen los elementos estructurales como vigas, columnas, muros, pisos, techos, cubiertas y elementos arquitectónicos como ventanas, acabados y divisiones.

CARGAS VIVAS: cargas en una construcción debidas a su uso, incluyen personas, muebles, objetos y divisiones que puedan cambiar de sitio.

CARGAS OCASIONALES: cargas diferentes a las vivas y las muertas que son causadas por agentes externos como los sismos, vientos, lluvias, granizo, movimiento de tierra y corrientes de agua.

CEMENTO: ingrediente aglutinante para el concreto obtenido de arcilla y piedra caliza o roca volcánica.

CEPA: comercialmente se le llama así al primer cuarto del culmo, es decir la parte inferior (usualmente los primeros 3 metros desde el suelo).

CERCHA: es una estructura que consiste en una unión de elementos que forman triángulos. Idealmente cada elemento recibe solo fuerzas axiales y las fuerzas se encuentran en los nudos o uniones sin momentos.

CONCRETO (HORMIGÓN): mezcla de cemento con arena y agua que al fraguar forma un material fuerte de apariencia pedregosa, comúnmente utilizado en el sector de la construcción.

CONCRETO REFORZADO: concreto que se fragua sobre varillas de acero para conformar elementos estructurales más fuertes.

COLUMNA: elemento estructural esbelto cuyo trabajo principal es a compresión.

CUELLO: se llama así a la parte de la unión entre el rizoma y el culmo.

CULMO: es la sección aérea y tallo de la guadua.

CHUSQUÍN: brote basal del rizoma de la guadua. Se utiliza éste generalmente para propagar la guadua pues es un método con buenos resultados.

DFMA: por sus siglas en inglés Design for Manufacturing and Assembly, constituye una metodología de diseño para la manufactura y el ensamble.

ENTRENUDO (CANUTO O CAÑUTO): en la guadua se llama así a la sección del tallo comprendida entre los nudos.

ESTERILLA: guadua abierta como si se tratara de un rollo desenrollado. Ver figura 2.3.2

ESTRUCTURAS ESPACIALES: en la arquitectura se llama así a las estructuras que tienen por objetivo cubrir grandes luces con poco material y peso. Por lo general son estructuras tipo cercha.

GUADUA: planta que se distingue por sus tallos robustos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares en forma triangular. Es una planta leñosa arborescente, perteneciente a la familia del bambú y del género de las gramíneas.

GUADUA ADULTA (MADURA, GECHA O HECHA): de tres a cinco años. El tallo se cubre de líquenes y hongos de color blanco grisáceo que no son perjudiciales para éste y cuya incidencia permite determinar la madurez del tallo. Es la época adecuada para su aprovechamiento pues posee su máxima resistencia.

GUADUA ANGUSTIFOLIA: guadua de hoja angosta nativa de regiones tropicales de América. Alcanza hasta los 30 metros de altura y diámetros de hasta 25 centímetros.

GUADUA CASTILLA: una de las formas biológicas de la guadua. Tallos de paredes gruesas, grandes diámetros y alturas.

GUADUA CEBOLLA: una de las formas biológicas de la guadua. Paredes más delgadas que la macana, mayores diámetros y distancia de entrenudos regulares y pocas o carencia ramas basales.

GUADUA COTUDA: guadua que presenta nudos con inclinaciones alternas.

GUADUA JUVENIL (BICHE): puede durar desde los seis meses hasta los tres años aproximadamente. Se desarrollan las ramas tumbando las hojas caulinares.

GUADUA MACANA: una de las formas biológicas de la guadua. Tallos de paredes gruesas, distancia de entrenudos regulares y abundantes ramas basales espinosas.

GUADUA ROLLIZA: se le llama así a la guadua en su forma natural, que conserva su forma cilíndrica. Ver figura 2.3.2.

GUADUA SECA: luego de seis años aproximadamente. Los hongos y líquenes de color blanco grisáceo pasan a ser plaquetas de color rojizo, el culmo se torna

amarillento, finaliza su ciclo vegetativo y comienzan a degradarse sus propiedades físico- mecánicas.

GUADUAL: conjunto de guaduas en una misma porción de terreno.

HIGROSCOPIA: capacidad de un material o una sustancia de absorber o ceder humedad al ambiente.

HOJAS CAULINARES: hojas de forma triangular, de color marrón o café claro, gruesas y con vellosidades punzantes que cubren al tallo en su primera etapa de desarrollo para proteger a éste y a las yemas.

LATAS (DE GUADUA): se llama así a la sección de guadua obtenida al hacer cortes longitudinales sobre la guadua. Ver figura 2.3.2.

MAMPOSTERÍA: tipo de construcción que consiste en la unión de bloques de piedra o ladrillos de arcilla o de concreto con cemento para conformar muros.

MAMPOSTERÍA CONFINADA: es la mampostería con vigas y columnas de amarre de concreto reforzado. Es la más común en nuestro medio.

MAMPOSTERÍA REFORZADA: es el tipo de mampostería que se refuerza con varillas que se introducen por los huecos de los ladrillos y se anclan con concreto de relleno.

MORFOLOGÍA: en biología se refiere al estudio de la forma de un organismo o sistema.

NUDO: en la guadua se llama así a la sección del tallo donde afloran las yemas.

PIE AMIGO: elementos oblicuos que transfieren cargas a elementos verticales.

RAÍCES ADVENTICIAS Y FIBROSAS: fibras o raíces que salen del rizoma.

RAMAS APICALES: ramas superiores con forma de espina de pescado que carecen de púas y sostienen el follaje.

REBROTE (RENUOVO, COGOLLO O ESPOLÓN): se le llama así al primer brote del culmo de la guadua por fuera de la tierra. Está cubierta de hojas caulinares y no posee ramas.

REVOQUE (REPELLO, PAÑETE O ENLUCIDO): capa exterior construida con base en mortero y que se aplica en la superficie de un muro.

RIENDAS LATERALES (RAMAS BASALES): ramas inferiores o de la sección basal de la guadua que poseen tres espinas en sus nudos y no presentan hojas.

RIOSTRA: pieza que asegura la invariabilidad de la forma de una estructura.

RIZOMA (CAIMÁN): parte del sistema radicular de la guadua. Tallo subterráneo.

ROLLIZA: estado cilíndrico natural de los tallos de guadua o madera.

SOBREBASA: comercialmente se le llama así al tercer cuarto del culmo (usualmente la sección comprendida entre los 7 y 11 metros desde el suelo).

SOLERA: elemento horizontal que sirve de base a la estructura de un muro e integra las cargas de los elementos en posición vertical.

SISMORESISTENCIA: propiedad o capacidad que se le provee a una edificación con el fin de proteger la vida y los bienes que la ocupan.

VARILLÓN: comercialmente se le llama así al último cuarto del culmo antes del copo (usualmente la sección comprendida a más de 11 metros del suelo).

VIGUETA: se llama así en construcción al elemento secundario que trabaja a flexión.

VIGA: elemento cuyo trabajo principal es a flexión.

XILÓFAGOS: organismos que se alimentan de los componentes principales de la madera.

YEMA: es un brote en el culmo o tallo de una guadua que posteriormente conformará una rama.

RESUMEN

La guadua es un recurso natural que posee excelentes características físicas, de sostenibilidad y estéticas que le confieren una ventaja frente a otros materiales en el mundo de la construcción.

Las características físico-mecánicas del bambú guadua son muy particulares, debido a esto, trabajar con éste expone unos retos muy diferentes a los que se presentan al trabajar con cualquier otro material, incluso la madera. Las propiedades mecánicas varían de guadua en guadua tanto como la complejidad de los factores externos en su ambiente natural, tales como el clima, el suelo, la inclinación del terreno, la edad del culmo, el contenido de humedad, su propia anatomía y morfología. Su durabilidad está dada por el manejo que se le da desde el momento de corte pasando por la preservación y secado y llegando hasta la protección por diseño y el mantenimiento.

Han existido innumerables intentos por solucionar problemas teóricos y prácticos de trabajar con dicha planta, en general podemos hablar de que las construcciones actuales en guadua requieren de una gran cantidad de mano de obra artesanal y por ende de tiempo y costo indirecto. En la práctica nunca se ha logrado el verdadero potencial de resistencia que posee la guadua. Todo lo mencionado en éste párrafo confluye en la unión; es esta al fin y al cabo la que determina la resistencia, el tiempo de construcción y los costos.

En nuestro medio, Colombia, existen proveedores que ofrecen guadua comercial con las dimensiones y la calidad requeridas para ser utilizadas en la construcción.

El presente trabajo muestra la investigación realizada en los campos anteriores y luego expone el proceso de diseño del sistema de construcción propuesto. Durante el diseño y la materialización del prototipo se utilizaron herramientas CAD/CAM/CAE (Computer-aided Desig / Computer-aided Manufacturing / Computer-aided Engineering) y metodologías de diseño como el DFMA (Design for Manufacturing and Assembly). El sistema de construcción resultante puede ser utilizado para la edificación de diversos tipos de construcciones.

PALABRAS CLAVE: GUADUA, CONSTRUCCIÓN, DISEÑO, SISTEMA, ARQUITECTURA.

INTRODUCCIÓN

Los años dedicados a la carrera académica de Ingeniería de Diseño de Producto y todo lo que implica están representados en el presente proyecto de grado. Consta de un proceso de diseño completo comenzando desde las investigaciones preliminares hasta la realización de un prototipo parcial que mostrará la manera como funciona el sistema de construcción en guadua desarrollado.

Resguardo y protección a factores ambientales son necesidades básicas fisiológicas de los seres humanos que nos brinda una vivienda. Las construcciones habitables, además de brindarnos lo anterior, nos permiten delimitar lo que es nuestro y hacernos sentir más seguros y cómodos. Son una extensión de nuestro ser y de nuestros pensamientos, nos identifica cultural y personalmente; la forma en que se hace, los materiales y los recursos que utiliza y sus acabados, entre otras, nos comunican y sugieren filosofías de los creadores y propietarios. Más allá de brindarnos resguardo físico cuenta con nuestra simpatía y reconocimiento mental y sentimental. Los diseñadores de construcciones habitables, construyen estilos de vida. Las construcciones habitables son aquellas edificaciones que poseen características adecuadas para que la ocupen personas, temporal o indefinidamente, tales como viviendas, oficinas, bibliotecas y más.

El universo, dinámico por naturaleza, día a día demanda una constante renovación. Catabolismo y anabolismo, muerte y nacimiento, destrucción y construcción; fuerzas contrarias que no podrían existir independientemente mantienen el equilibrio. Es así como nuestro mundo, lleno de edificaciones con unas características definidas, demanda hoy una serie de nuevas edificaciones con nuevas características.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

Durante este capítulo se realizará una introducción a lo que es el proyecto en sí. Se hablará de cómo ha sido el ámbito de la construcción en el mundo a grandes rasgos y en específico la construcción en Guadua. Luego se argumentará por qué es válido el proyecto, luego se expondrán sus objetivos, y hasta donde abarcará el trabajo en sí (delimitación) y por último la metodología seguir.

1.1 ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo han existido innumerables y diferentes sistemas de construcción. Se han utilizado materiales como la piedra, el concreto, la tierra, la arcilla, el acero, el aluminio, la madera, el hielo, los polímeros, etcétera; existen sistemas de construcción artesanales, prefabricados, automatizados y otros más. Cada tipo de construcción se ha desarrollado para unos fines específicos diferentes y por ello solo se puede decir que uno es mejor que otro cuando se comparan bajo las mismas condiciones y para los mismos fines.

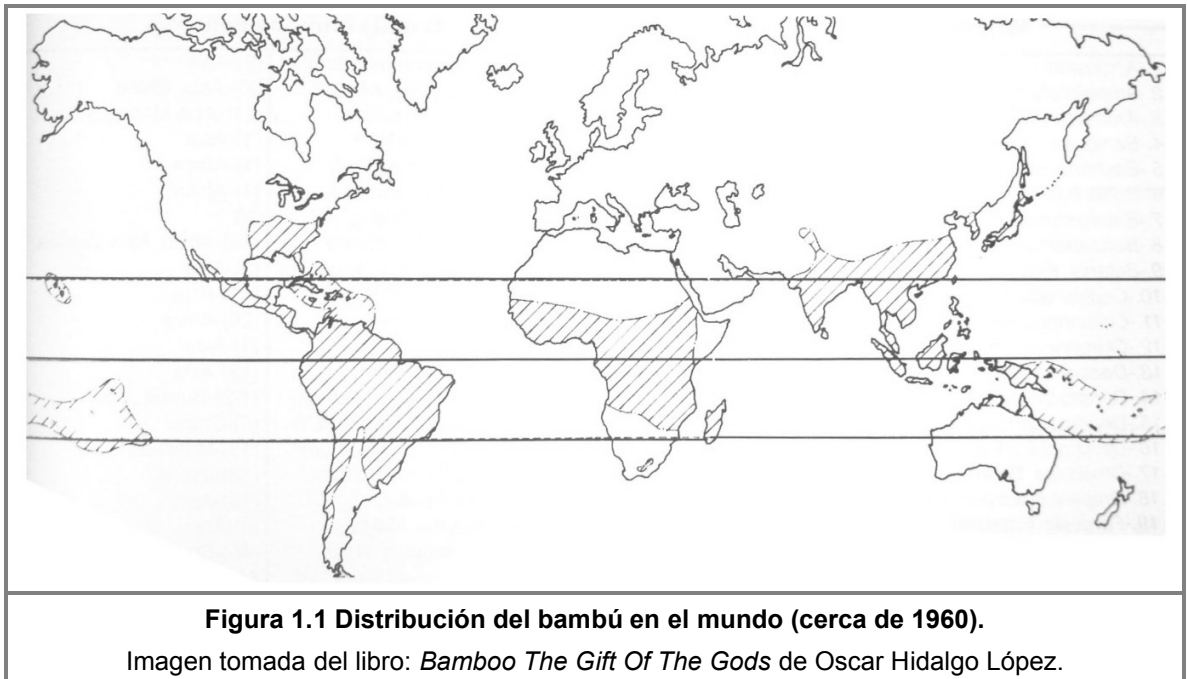
El Bambú, como material de construcción, ha sido utilizado desde tiempos antes de Cristo. La construcción más antigua en bambú fue hallada en la península Santa Helena cerca de Guayaquil en la costa de Ecuador por el arqueólogo Karen E. Stothert en 1988 la cual data con una antigüedad de 9.500 años ¹.

El bambú es una planta que existe en todos los continentes del mundo con excepción de Europa. En América han sido identificadas cerca de 440 especies de las cuales 320 son maderables y todavía quedan muchas por descubrir. Asia es el mayor continente en especies de bambú con cerca de 1.000 especies y África es el menor con cerca de 12 especies. La planta que conocemos como guadua, en realidad corresponde a varias especies de bambú maderable y gigante (de las cuales faltan algunas por identificar científicamente) que solo se encuentran en América.

Según cronistas españoles que vinieron a América en el siglo XVI con Cristóbal Colón, indígenas nativos vivían en comunidades en el interior de inmensos bosques de bambú. El bambú fue el material más importante para dichos nativos, lo utilizaron para todo, desde su nacimiento cortando el cordón umbilical con un

¹ HIDALGO, Oscar. Bamboo The Gift Of The Gods, Primera edición 2003, p. 366

cuchillo hecho de bambú, hasta su muerte en la que los cuerpos eran envueltos en tablas o tejidos de bambú. Vivían en viviendas de bambú rodeados por un fuerte en bambú, cocinaban y hacían música con el bambú ².



En Colombia, los antecedentes de construcción en guadua están relacionados con su abundancia, accesibilidad y facilidad para transformarse en objetos de uso humano.

Una de las más grandes culturas del bambú estuvo ubicada en la parte noroccidental de Sur América entre la costa Atlántica de Colombia y el golfo de Guayaquil en Ecuador, en la costa Pacífica. En dicha zona se encontraron los más grandes y densos bosques de guadua y mayor diversidad de especies; acá, los indígenas desarrollaron tecnologías de construcción de viviendas y puentes con bambú y fueron los mejores constructores de toda América ³.

² HIDALGO, Op.Cit., p. 367

³ HIDALGO, Op.Cit., p. 367

En la región seca de Perú, donde el bambú no crece, dos grandes imperios desarrollaron tecnologías de construcción con dicha planta importándola desde el golfo de Guayaquil: los *Chimú* (ubicados en la costa) y los *Incas* (ubicados en las montañas).

Durante la colonización de América, los españoles exterminaron la mayoría de los indígenas y con ellos a sus bosques de bambú (incluyendo la ciudad de *Guamarcaah*, capital de la cultura *quiche* en Guatemala quienes fueron descendientes de los mayas). A mediados del siglo XVIII antioqueños descendientes de los españoles emigraron a las montañas fundando el estado de Caldas y la ciudad de Manizales. Durante aquel largo viaje utilizaron a indígenas como guías y sobre éstos caía la responsabilidad de conseguir alimento y construir botes, puentes y viviendas temporales (construidas típicamente en guadua) en las cuales podían vivir varios meses y en lugares que terminaban fundando pueblos ⁴. A finales del siglo XIX y principios del XX se construían casas de bahareque con guadua y se revocaban con una mezcla de boñiga de caballo y arcilla luego en los años setentas éstas se revocaban con mortero de cemento (una parte de cemento por dos de arena).

En la ciudad de Manizales, tanto ricos como pobres construyeron sus casas utilizando a la guadua como materia prima principal. Luego poco a poco la construcción con guadua fue siendo reemplazada con ladrillo y cemento y las construcciones con guadua pasaron a percibirse como construcciones precarias de personas pobres.

⁴ IBID, p. 370



Figura 1.2 Construcciones en guadua en la ciudad de Manizales.

En la actualidad y en nuestro medio colombiano el tipo de construcción más usado es el de mampostería confinada; formando vigas y columnas de amarre de concreto reforzado y uniendo ladrillos con cemento para conformar muros. Es un sistema de construcción que ha evolucionado con los años. Su ventaja hoy radica en que gracias a su estandarización es fácil de aplicar y a bajos costos.

Ahora, las construcciones de guadua se están dando a conocer en el mundo y no precisamente por la antigua precariedad reconocida, sino por su avanzado tecnicismo y su amabilidad ambiental. Ingenieros, artistas, arquitectos y diseñadores reconocidos del mundo han comenzado a utilizar dicho material como base de sus grandes creaciones. Entre las construcciones más reconocidas se encuentran los puentes del carpintero alemán Jörg Stamm, las realizadas por el arquitecto Colombiano Simón Vélez como el pabellón ZERI, entre otras (ver figura 1.3)

Con el nuevo crecimiento innegable de la conciencia ambiental en el mundo se están demandando cada vez más construcciones sostenibles o amigables con el medio ambiente y han surgido entonces nuevos sistemas de construcción y ha crecido la demanda de métodos de construcción alternativos como los de guadua y madera.



1.2 JUSTIFICACIÓN

Las construcciones que utilizan la guadua como su principal materia prima, aumentan su competitividad en la medida en que se ajustan a las nuevas necesidades y solucionan viejos inconvenientes. Algunas de estas necesidades e inconvenientes se mencionarán a continuación.

La mano de obra de la construcción en guadua realizada por el arquitecto Simón Vélez se lleva un 80% de los costos de la totalidad de un proyecto ⁵. La guadua se puede considerar un material de bajo costo, pero los costos de su construcción hoy son acarreados en gran parte por la mano de obra; éste es un inconveniente a solucionar para aumentar la competitividad de ésta como material de construcción.



Figura 1.5 Proyectos en guadua en fase de construcción.

La mampostería, el tipo de construcción más usado hoy, presenta inconvenientes que pueden ser superados fácilmente por construcciones en guadua. Los principales materiales en la construcción en mampostería son el cemento y el ladrillo, los cuales son materiales de origen cerámico extremadamente rígidos (no flexibles). Debido a esto, al soportar enormes cargas como las de un sismo, en lugar de deformarse, se fracturan, perdiendo la estructura misma de la construcción y colapsando. La guadua posee una excelente relación peso-

⁵ PORTAFOLIO. 18 de febrero de 2008. p. 22

resistencia y una flexibilidad que lo hace un material de características sismorresistente.

Casos reales respaldan el carácter sismo-resistente de la guadua. En Costa Rica, en el año 1991, se produjo un terremoto de 7.7 grados de magnitud. El holandés e Ing. Civil Jules Janssen, encargado de desarrollar códigos de construcción en un laboratorio en Holanda se encontraba en aquel lugar, luego de lo ocurrido, recorrió la zona del epicentro y descubrió que todos los edificios de ladrillo y concreto habían colapsado, pero las 20 estructuras construidas allí con bambú se mantuvieron erguidas y sin grietas ⁶.

El sismo ocurrido en Armenia, el 25 de junio de 1999, hizo colapsar cerca del 60% de las edificaciones que allí se encontraban ⁷. Para reconstruir la zona las autoridades han recomendado la utilización de la guadua por su accesibilidad en la región y su carácter sismorresistente.

Otro inconveniente que presenta la construcción en mampostería es el peso de los materiales utilizados que se traduce en inconvenientes para el transporte y la resistencia sísmica. Durante un sismo, una construcción en mampostería presenta altas fuerzas de inercia debida al peso de los materiales que deben ser consideradas. Una construcción en mampostería que tenga buena resistencia sísmica generalmente requiere de gran cantidad de materiales.

Por otro lado, la construcción en mampostería requiere de largos tiempos y de gran cantidad de mano de obra calificada y esfuerzo físico de los obreros debido al peso de los materiales. Hoy se demandan cada vez más construcciones que se realicen en periodos cortos de tiempo.

⁶ http://www.derf.com.ar/despachos.asp?cod_des=181878&ID_Seccion=65

⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/1999_Armenia_earthquake

Debido al creciente e innegable estallido de la problemática ambiental se está demandando cada vez más construcciones sostenibles o amigables con el medio ambiente. La guadua se presenta como un material de gran importancia para que las construcciones se ajusten a las nuevas necesidades ambientales. La guadua es una planta maderable que se aprovecha más rápidamente que cualquier árbol, pues *“es una de las plantas con más rápido crecimiento del planeta”*⁸ y luego de establecido un guadual se reproduce por si misma. Su aprovechamiento no se hace por talarraza como en los cultivos de árboles forestales, se realiza por entresaca y el guadual nunca es eliminado. Sus dimensiones y peso la hacen más fácil de manipular que un tronco de árbol contribuyendo a reducir enormemente las necesidades energéticas en su procesamiento (Corte, troceo, transporte, secado, etc.)

La guadua angustifolia kunt, es una de las especies de bambú más aptas para ser utilizadas en la construcción gracias a su tamaño, resistencia mecánica y durabilidad en comparación con otras especies de bambú. En Colombia se cuenta con grandes extensiones de dicha planta. La producción de guadua nacional en su gran mayoría es sub-valorada, utilizadas incluso en sectores como material desechable (ver figura 1.6). Económicamente es un material de bajo costo que representaría una gran utilidad al ofrecerse en el sector de la construcción como producto terminado.

En los países americanos donde el género guadua es nativo, la mayoría de las especies han sido exterminadas o puestas en riesgo de extinción. Colombia es el único país que ha preservado casi todas sus especies.

⁸ Curso: Estructura y Cultivo de la Guadua. Diciembre de 2006. SENA



Figura 1.6 Usos comunes de la guadua como material desechable.

A. Envarado de cultivos, **B.** Cercas, **C.** Construcciones temporales.

- **Hipótesis:** Un sistema de construcción modular en guadua prefabricado, de rápido y fácil armado que permitiera la construcción de estructuras seguras y de costo competitivo, tales como viviendas, pérgolas, pabellones y/o cubiertas de grandes luces, tendría una gran aceptación en el sector de la construcción y representaría un proyecto económicamente atractivo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

Desarrollar un prototipo funcional de una estructura en guadua que evidencie sus ventajas en cuanto a reducción de costos de mano de obra y de tiempos de construcción.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Utilizar la Guadua como material de construcción para darle un mayor valor agregado a la misma y darle al sistema de construcción a desarrollar un carácter ambiental.
- Disminuir los costos de mano de obra y aumentar la facilidad de construcción, para estructuras diseñadas en guadua, desarrollando un sistema que facilite el ensamble.
- Desarrollar un tipo de unión para guaduas que aproveche al máximo posible las propiedades mecánicas de la planta para reducir el peso, las necesidades volumétricas y la demanda de guadua por el sistema de construcción desarrollado.
- Reducir los tiempos de construcción, mediante el diseño del sistema anteriormente mencionado aumentando su atractivo comercial y posiblemente entrando a diversos mercados como por ejemplo el de estructuras temporales.
- Bajar el peso de los materiales de construcción, utilizando la guadua como base, para darle a las construcciones mayor resistencia sísmica.

1.4 ALCANCE

1. Prototipo experimental, con materiales reales en escala 1:1 y apto para operar en las condiciones para las que fue diseñado, de estructura en guadua como elemento para la construcción.
2. Memorias de cálculo y/o pruebas de laboratorio.
3. Modelación 3D y planos de taller y ensamble.
4. Pruebas de usuario que confirmen las especificaciones de diseño (PDS)

1.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo adecuado del proyecto se sugiere realizar los siguientes pasos:

- Investigar las propiedades físicas de la guadua en textos especializados y determinar promedios y valores aceptables para el proyecto.
- Investigar sistemas de construcción representativos que aporten ideas y soluciones para el proyecto, mediante entrevistas a especialistas y consultas en bibliotecas e Internet para determinar sus ventajas y desventajas.
- Investigar los sistemas de construcción en guadua existentes mediante consulta por Internet, entrevistas a especialistas y visitas al eje cafetero colombiano para determinar sus ventajas y desventajas.
- Investigar dimensiones promedio y tipos de guadua que se ofrecen comercialmente, mediante visitas a proveedores para luego diseñar el sistema de construcción con base en estos datos.
- Crear un PDS (Product Design Specifications) y realizar actualizaciones de éste a medida que se obtiene información de las investigaciones anteriormente mencionadas para tomar éste como base para los siguientes puntos.
- Diseñar propuestas como alternativas para el sistema de estructura en guadua mediante métodos creativos para determinar ventajas y desventajas de cada una.
- Desarrollar el sistema de construcción definitivo a partir del estudio antes mencionado y probarlo mediante análisis CAD/CAM/CAE y/o métodos experimentales para prever su comportamiento.
- Construir un prototipo y someterlo a prueba para corroborar las proyecciones de los desarrollos anteriores.

2. INVESTIGACIONES PREVIAS

Es fundamental para el resultado del diseño del presente proyecto, realizar unas investigaciones previas que esclarezcan dudas y amplíen el panorama general.

Es necesario entonces conocer primero sobre las propiedades físicas de la guadua; como se comporta, como es su estructura interna, su forma y que resistencia mecánica puede brindar. Luego se realizará una investigación sobre el estado del arte en todo lo referente a construcciones e innovaciones en guadua. Y por último se investigará sobre la guadua comercial; que segmentos de guadua, en que diámetros, espesores y largos se presentan y a que precios se ofrecen.

Se realizó además una investigación sobre el estado del arte de la construcción en general para tomar ideas y comparar luego con el sistema desarrollado la cual se incluyó en los anexos (Anexo A) y no en el presente capítulo.

2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GUADUA

Si algo es común en la naturaleza, es su variabilidad. No hay dos elementos en la naturaleza que sean iguales y la guadua no es la excepción. No existen dos trozos de guadua que sean iguales, aún siendo el mismo segmento de la planta. Las condiciones edafoclimáticas en las que está un guadua cambian, variando de igual manera características como la tasa de crecimiento, altura, diámetro, espesor, forma y anatomía, que generan diferentes propiedades físico-mecánicas.



Figura 2.1.1 Culmos de guadua para aprovechamiento.

Debido a lo anterior, realizar un estudio sobre las propiedades mecánicas de la guadua que arroje datos estándar es difícil; en el mundo no se ha realizado aún una investigación que brinde resultados rotundos y estándares sobre las propiedades mecánicas de la guadua y no existe un código.

Muchas pruebas realizadas no son válidas pues sus autores, desconociendo las características de la planta, han tomado ejemplares al azar con diferentes formas, tamaños, ubicaciones, estado de madurez y contenido de humedad; en muchos de los casos ni se nombran estos factores, los cuales son decisivos para los resultados.

La gran variabilidad de factores que influencia los resultados de resistencia mecánica de un bambú, dificulta su estandarización y prácticamente obliga a que se realicen pruebas por cada sitio. Hoy en día, a la hora de realizar un diseño en

guadua y calcular su estructura, lo que normalmente se hace es utilizar unos esfuerzos admisibles bajos o unos factores de seguridad muy prudentes.

2.1.1 Algunos factores que influyen las propiedades mecánicas del bambú. Existen diversos factores que influyen y hay que tener en cuenta para estudiar las propiedades mecánicas de bambú. A continuación se enumeran algunos:

- **El clima.** La temperatura, la pluviosidad, la humedad, los vientos, la presión atmosférica y el brillo solar tienen influencia directa sobre el desarrollo y las propiedades mecánicas de la guadua.

Los culmos del bambú *Dendrocalamus strictus* que crecen en un clima seco poseen mejores propiedades físico-mecánicas que los que crecen en un clima húmedo⁹.

El promedio mínimo de precipitación anual requerido para la *Guadua angustifolia* es de 1300mm¹⁰ y el brillo solar óptimo se encuentra entre los 1800 y 2200 horas/luz/año¹¹.

La altitud (altura sobre el nivel del mar), que influye directamente el clima, influye el crecimiento y la calidad de la guadua. El mejor desarrollo de la *Guadua angustifolia* en términos de grandes diámetros, alturas y espesores se da entre los 1200 y 1500m.s.n.m¹². Temperaturas bajas por tiempo prolongado

⁹ GNANAHARAN, R. Physical and strength properties of *Dendrocalamus strictus* grow in Kerala, India. 1991.

¹⁰ LONDOÑO, Ximena. La Guadua. Revista Procaña. 1996. p.11-15.

¹¹ CRUZ, H. La Guadua Nuestro Bambú. Corporación Autónoma Regional del Quindío y Centro Nacional de Estudio para el Bambú Guadua. Armenia, Quindía, Colombia. 1994. p 293.

¹² GARCÍA, Jorge Hugo. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunt), orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. 2004.

propias de altitudes mayores a 1500m o temperaturas elevadas propias de altitudes menores a 1000m retrasan el desarrollo ¹³.

- **El suelo.** La guadua es más susceptible a las propiedades físicas del suelo que a las químicas ¹⁴. En suelos con buenas características físicas (profundidad efectiva, estabilidad estructural, densidad aparente, porosidad total) la guadua logra un buen desarrollo. No obstante, se observa que la guadua se desarrolla mejor en suelos ligeramente ácidos pero aumentan sus propiedades mecánicas en suelos neutros y ligeramente alcalinos ¹⁵.

- **La inclinación del terreno.** Una investigación realizada en indonesia demostró que los culmos de bambú *Gigantochloa pseudo-arundinacea* que crecían en las laderas inclinadas tenían módulos de elasticidad y resistencia a la tracción mayores que los que crecían en los valles ¹⁶.

Las tierras en la región del eje cafetero son suelos jóvenes de origen volcánico en los cuales las laderas han sido erosionadas arrastrando nutrientes al valle geográfico (vega). No se sabe por qué factor, pero las guaduas que crecen en el valle geográfico poseen menor resistencia a compresión y a flexión que las que crecen en cordillera ¹⁷.

¹³ AGUDELO, B., TORO, I. Evaluación del desarrollo de los bosques de *Guadua angustifolia* en la zona de jurisdicción de la CVC, bajo diferentes condiciones de sitio, con fines de reforestación. Tesis, Universidad del Tolima. Ibagué. 1994. p 168.

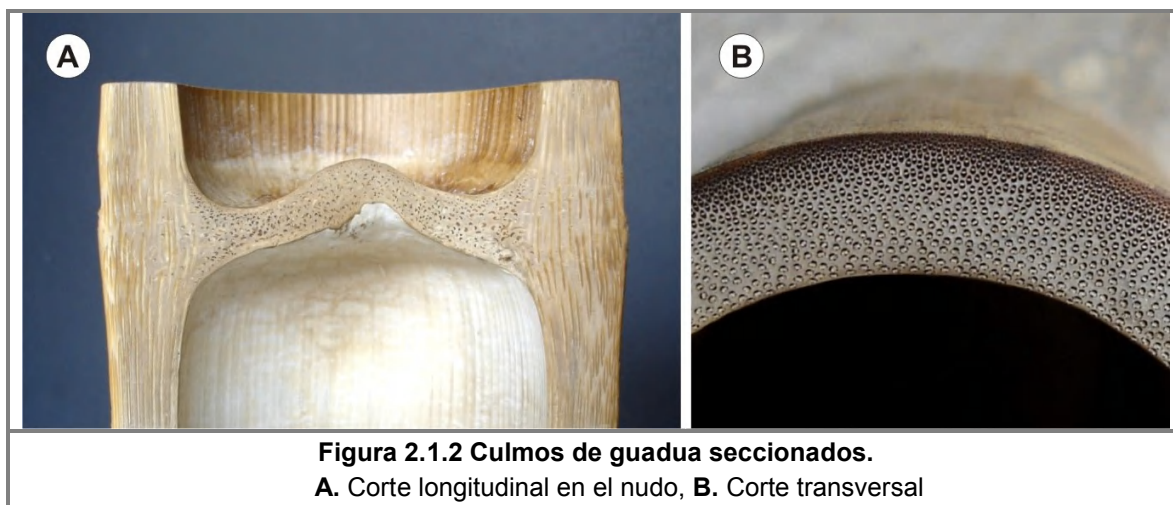
¹⁴ CAMARGO, Juan Carlos. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunt in the Coffee Region of Colombia. PhD. Tesis. Göttingen Universität. Cuvillier, Verlag, Göttingen, Deutschland. 2006. p 205.

¹⁵ CAMARGO, Juan Carlos; GARCÍA, Jorge Hugo; MORALES, Tito. Cambios en la productividad de rodales naturales de *Guadua* (*Guadua angustifolia* Kunt) bajo diferentes condiciones de sitio y de manejo silvicultural en el eje cafetero de Colombia. In: Proceedings VI international seminar on environmental and sustainable development. Bogotá, Colombia. Octubre 8 al 10 de 2003.

¹⁶ SOEPRAYITNO et al. 1988.

¹⁷ AGUDELO, B., TORO, I., Op. Cit., p 168.

- **La edad del culmo.** La edad de maduración de la *Guadua angustifolia* es de 5 años ¹⁸. La guadua entre 3 y 6 años presenta mayor resistencia a la compresión que las de 1 a 3 años ¹⁹.
- **El contenido de humedad.** El contenido de humedad es la cantidad de agua que posee la guadua en relación a su peso seco. Este influencia inversamente las propiedades mecánicas del mismo; a menor contenido de humedad mayor resistencia ²⁰.
- **Anatomía y morfología.** La estructura anatómica y morfológica están correlacionadas con las propiedades físico-mecánicas e influye directamente los métodos de preservación y secado.



Los culmos maduros de guadua son plantas leñosas maderables de forma cilíndrica con segmentos huecos (ver figura 2.1.2)

El xilema y el floema están juntos dentro del haz vascular, rodeados por haces de fibras y embebidos en tejido parenquimatoso (ver imágenes A y C de la figura

¹⁸ LONDOÑO, Ximena. Diplomado Internacional Gestión Integral de la *Guadua angustifolia*. Universidad Tecnológica de Pereira. 2 de Febrero de 2009.

¹⁹ Departamento de Ingeniería Agrícola Martín Mateus.

²⁰ IBID.

2.1.3); hay presencia de cristales de sílice alrededor de los haces vasculares y en los espacios intercelulares del parénquima. La presencia de cuerpos silíceos aumenta con la edad. Las fibras son muy fuertes y están dispuestas axialmente en toda la planta con la excepción de los nudos, en los cuales las fibras cambian de dirección para abarcar los tabiques o diafragmas (ver imagen B de la figura 2.1.3).

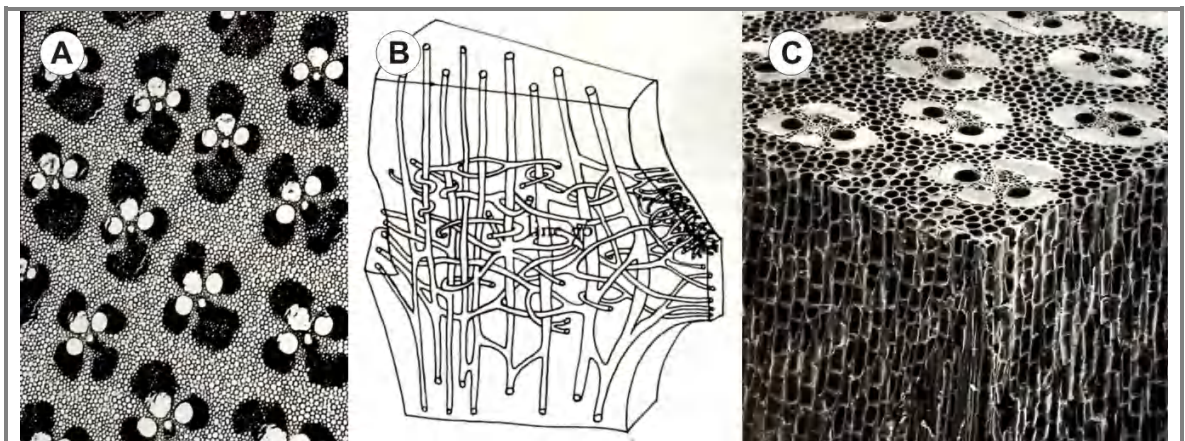


Figura 2.1.3 Morfología básica de la guadua.

A. Haces vasculares embebidos en parénquima (corte transversal), **B.** Conexiones vasculares en el nudo, **C.** Vista tridimensional de los haces vasculares embebidos en parénquima.

Fuente: *The Anatomy of Bamboo Culms*, Walter Liese. 1998.

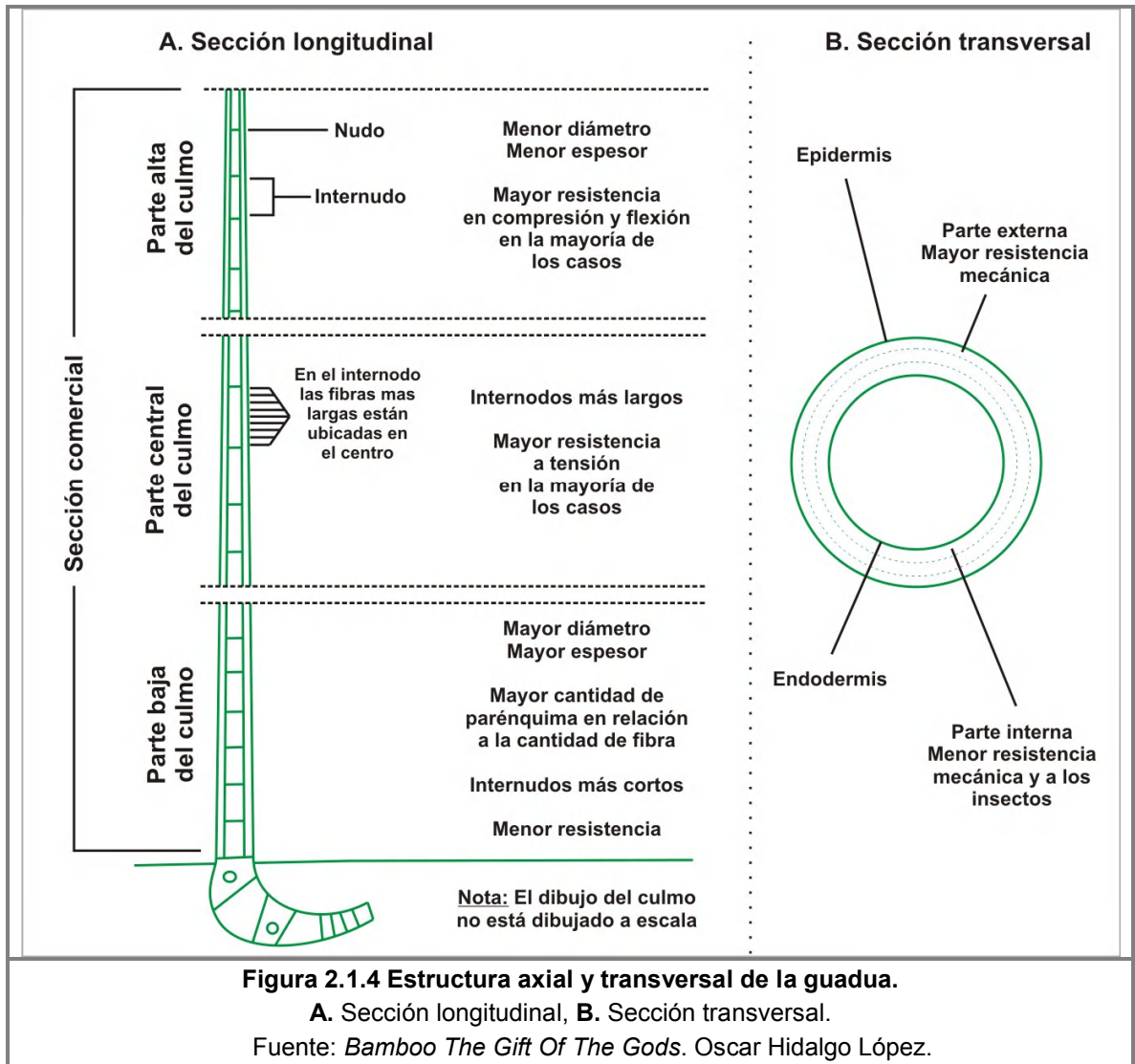
La parte superior de un culmo posee menos tejido parenquimatoso que la parte inferior (ver tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de tejidos en la Guadua angustifolia

Tejido	Segmentos			Total
	Basal	Medio	Apical	
Parénquima	63	64	36	51
Fibra	29	26	56	40
Conductivo	8	10	8	9

Fuente: Caracterización de la Guadua. Cenicafe

El diámetro y espesor inferior del culmo son mayores que en la parte superior. La distancia entre nudos es menor en la parte inferior que en la superior.



A lo largo de un entrenudo, en su centro se encuentran las fibras de mayor longitud; cerca de los nudos, a unos dos centímetros, se encuentran las fibras más cortas; las fibras más largas de una guadua se encuentran en la mitad de los entrenudos del segundo tercio (parte central) de un culmo; existen autores que dicen que en la mayoría de los casos dicha parte posee la mayor resistencia a tensión y que el tercer tercio (parte alta) posee la mejor resistencia a la compresión y a la flexión de todo el culmo (ver figura 2.1.4)²¹. Radialmente la

²¹ HIDALGO, Op.Cit., p. 80-82

guadua presenta mayor dureza y mayor contenido de fibras en la parte externa que en la interna (ver imagen B de la figura 2.1.2).

2.1.2 Resultados de propiedades mecánicas que se tendrán en cuenta para el presente proyecto. A continuación, en la tabla 2, se muestra una compilación de los datos confiables de los autores mencionados y sus promedios.

Tabla 2. Resistencia mecánica de la guadua: Valores que se tendrán en cuenta para el presente proyecto.

Autor	Tipo de esfuerzo	Compresión (N/mm ²)	Tensión (N/mm ²)	Flexión (N/mm ²)	Cortante (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)
Martín, Mateus, Hidalgo, 1981 Bogotá	S _y prom	49,00	109,00			9000
	S _y min	35,00				6000
García, Martínez, 1991 Quindío	S _y prom	38,00		30,00	3,80	3000
	S _y min	34,30		17,50	2,30	2500
Trujillo, & López L. F. 2000, Medellín	S _y prom	46,50	54,50		6,15	12000
	S _y min	28,00	35,00		4,30	6000
FMPA, ZERI, Stuttgart 1999	S _y prom	41,50	90,00	74,00	4,30	18000
	S _y min	27,00				
Giraldo E. y Sabogal A. 2007	S _y prom	46,63				7856
	S _y min	42,02				
Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Bogotá	S _y prom	59,25	118,60			14000
	S _y min	52,50	94,30			10700
Promedios de los autores	S _y prom	46,81	93,03	34,67	4,75	10643
	S _y min	36,47	64,65	17,50	3,30	6300
Valores admisibles para el proyecto	σ _{adm}	15,00	30,00	15,00	1,10	7500

S_y prom: resistencia de rotura promedio en el estudio realizado por el autor





S_y min: resistencia de rotura mínimo en el estudio realizado por el autor

σ_{adm}: resistencia admisible

2.1.3 La guadua en comparación con otros materiales. Comúnmente los materiales son comparados por su resistencia en relación con el área transversal pero ello no brinda información muy práctica para este caso. Debido a esto y para tener una idea del comportamiento de la guadua frente a otros materiales, se realizó el siguiente ejemplo comparativo.

Utilizando miembros estructurales de diferentes materiales y con características similares de peso (8.7Kg) y largo (2.5m), se realizaron cálculos para comparar sus propiedades mecánicas; ver tabla 3. Los miembros estructurales presentan secciones comúnmente utilizadas.

Tabla 3. La guadua en comparación con otros materiales

Variable	Material (miembros estructurales de 2,5m de largo y 8,7Kg de peso)			
	Madera Pino Ponderosa	Guadua	Acero A36	Concreto
Densidad (g/cm ³)	0,55	0,70	7,85	2,32
Peso del miembro (g)	8700	8700	8700	8700
Largo del miembro (mm)	2500	2500	2500	2500
Área transversal (mm ²)	6327,84	4970,64	442,88	1499,87
Sección transversal del miembro				
Radio exterior R (mm)	44,88	60,06	46,54	21,85
Radio interior r (mm)	0,00	45,00	45,00	0,00
Precio del metro lineal del miembro (\$)	5568	4000	12500	1600
Momento de Inercia I (mm ⁴)	3186407	6998913	464019	179018
Radio de giro <i>i</i>	22,44	37,52	32,37	10,93
Relación de Esbeltez λ	111,41	66,62	77,23	228,83
Módulo de elasticidad a compresión (N/mm ²)	9000	10000	200000	2920
Esfuerzo máximo a compresión (N/mm ²)	36,00	46,81	250,00	57,90
Fuerza máxima admisible por el miembro a compresión considerando el pandeo (N)	45286	110522	73231	825

Variable	Material (miembros estructurales de 2,5m de largo y 8,7Kg de peso)			
	Madera Pino Ponderosa	Guadua	Acero A36	Concreto
Módulo de elasticidad a tensión (N/mm ²)	9000	10000	200000	11200
Esfuerzo máximo a tensión (N/mm ²)	55,00	93,03	250,00	0,91
Fuerza máxima admisible por el miembro a tensión (N)	348031	462419	110719	1365
Relación fuerza admisible por el miembro a compresión/peso (N/g)	5,21	12,70	8,42	0,09
Relación fuerza admisible por el miembro a tensión/peso (N/g)	40,00	53,15	12,73	0,16
Relación fuerza admisible por el miembro a compresión/costo (N/\$)	3,25	11,05	2,34	0,21
Relación fuerza admisible por el miembro a tensión/costo (N/\$)	25,00	46,24	3,54	0,34

Nota: algunas de los miembros estructurales mencionadas no se consiguen comercialmente con la sección mencionada. La tabla presente constituye un mero ejemplo comparativo.

Por los valores de la tabla 3 se deduce que el verdadero atractivo de la guadua es su resistencia en relación a su peso y a su costo; características de gran importancia para que una construcción sea sismo-resistente y competitiva.

La relación fuerza admisible por el miembro / peso indica la cantidad de fuerza en newton que aguanta dicho miembro por gramo de peso del mismo. Los mejores valores los presenta la guadua y son significativamente más altos que los del acero y el concreto.

La relación fuerza admisible por el miembro /costo indica la cantidad de fuerza en newton que soporta el miembro por cada peso (\$) que cuesta el mismo. Aquí también el miembro estructural con mejores propiedades es el de guadua, llegando a tener hasta 13 veces mayor resistencia a tensión (N) por unidad de dinero (\$) que el de acero.

El momento de inercia es una propiedad geométrica de la sección transversal del miembro estructural que nos indica cual es la tendencia de éste a resistirse a flectarse o pandearse. Es de resaltar que el mejor valor lo presenta el miembro de guadua.

Una columna es un elemento cuyo trabajo principal es a compresión y es esbelto, es decir, con una forma delgada y larga. La relación de esbeltez es una característica mecánica que relaciona la rigidez de la sección transversal de un miembro con su largo y para nuestro caso práctico nos brinda información sobre que tanto se pandeará al ser sometido a fuerzas de compresión. Una columna tendrá un mejor comportamiento en la medida en que tenga una menor razón de esbeltez. El miembro de guadua es el que mejor comportamiento tendría en dichos términos.

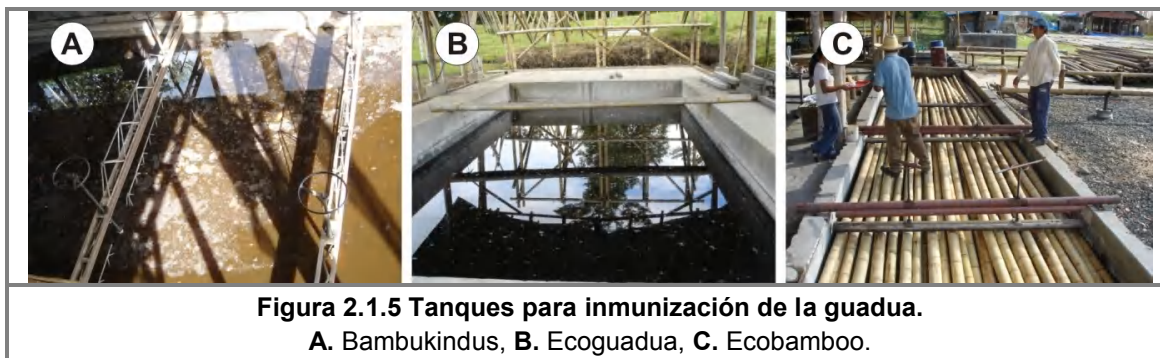
2.1.4 La durabilidad de la guadua. La guadua debe tener una serie de prácticas silviculturales y tratamientos apropiados para que cuente con las características físicas deseadas para utilizarse en la construcción.

- **La edad del culmo.** Para que la guadua tenga mejores propiedades mecánicas, al momento de corte debe estar madura o “hecha”. Ésta se caracteriza por la desaparición de lustre en el tallo, coloración más clara y aparición manchas de líquenes color gris claro de forma redondeada a oblongada con diámetros de hasta tres centímetros. La definición de madurez hoy, es dada de manera subjetiva y en la práctica no se realizan mediciones de la edad; aunque se está realizando una investigación en la Universidad Tecnológica de Pereira para desarrollar aparatos electrónicos que midan objetivamente la edad de un culmo. Usualmente deben tener una edad mayor a los tres años para estar aptos para aprovechamiento. Guaduas con menor edad, poseen mayor contenido de azúcares y posiblemente mayor ataque por parte de insectos xilófagos.

- **Momento de corte de la guadua.** Se dice que para prevenir el ataque de insectos perjudiciales, la guadua debe ser cortada cuando tenga el menor contenido de agua posible, en época de verano y en luna menguante durante horas nocturnas (entre las 12pm y 4am), cuando la acción fotosintética de la planta y la atracción lunar es mínima.
- **Avinagrado (Curado en mata).** Luego de cortada la guadua, se recomienda dejarla en el guadual, aislada de la humedad del suelo, durante unos 20 días aproximadamente para que los azúcares contenidos se transformen en alcohol. Los pasos anteriores (sobre el momento de corte y el avinagrado), aunque no están comprobados científicamente, se dice que disminuyen el riesgo de ataque de insectos y hongos.
- **Preservación química.** Luego se debe preservar químicamente. Existen diversos métodos, unos mejores que otros según sea la aplicación. Hoy se recomienda, para la guadua que va a estar en contacto usual con el hombre y en ambientes interiores, utilizar preservantes de baja toxicidad.

El método más recomendado y usado hoy consiste en sumergir la guadua durante 3 a 5 días en tanques con la solución preservante (4% de ácido bórico más 4% de sales de bórax disueltos en agua). Dicha solución sirve también para retardar la acción del fuego. La guadua debe entrar a dichos tanques con los diafragmas previamente perforados o con perforaciones laterales que den acceso a la parte interna de los canutos y un contenido de humedad entre 80 y 50% para que absorba adecuadamente el preservante.

El método de desplazamiento de savia o boucherie, que no es muy utilizado hoy y todavía presenta algunos inconvenientes, será quizás el de mayor potencial para una industrialización de la guadua en un futuro.



- **Secado.** Luego la guadua debe ser secada por algún método (al aire libre, en horno, en invernadero u otro) hasta lograr el contenido de humedad de equilibrio del ambiente o menor según el uso y el lugar donde va a ser utilizada. Esta etapa es fundamental para impedir rajaduras posteriores.



El proceso de secado busca controlar las variables ambientales del entorno en que se encuentra la guadua para extraer rápidamente su contenido de agua.

La manera como se realice es crucial debido a que la contracción que realiza la guadua durante este proceso puede hacer que se raje fácilmente. La contracción volumétrica de la guadua es de aproximadamente un 18%, correspondiendo a un 0.5% de contracción longitudinal, 9% de contracción radial y un 8.5% de contracción tangencial ²².

²² MONTOYA, Jorge Augusto. Diplomado Internacional Gestión Integral de la Guadua angustifolia. Universidad Tecnológica de Pereira. Febrero de 2009.

La guadua es un material higroscópico y realiza intercambios de humedad con el ambiente. Contrario a lo que se cree comúnmente, cubrir la guadua con productos como el barniz no le impide realizar dicha acción pues lo hace por las caras que no son barnizadas. De hecho se recomienda aplicar productos de recubrimiento con protección contra los rayos ultra violeta y realizar mantenimientos periódicos si la guadua está expuesta al sol. Hay que tener en cuenta que para aplicar el barniz la guadua debe estar seca al contenido de humedad de equilibrio con el ambiente.

- **Protección por diseño.** La guadua debe protegerse del clima (sol directo, humedad del suelo y agua) por diseño. La edificación debe tener un techo con aleros amplios (por lo menos de 1/3 de la altura) y las guaduas deben estar separadas del suelo considerablemente (por lo menos 50 cm) para impedir el contacto con la humedad del suelo y el salpique o brisas de las lluvias ²³. En el gremio guaduero de la construcción se dice que las edificaciones deben tener unas *“buenas botas y buen sombrero”*.

2.1.5 Conclusiones y recomendaciones sobre las propiedades físicas de la guadua.

- Los factores de seguridad otorgados a la guadua son mayores que los que se le otorgan al acero o al concreto, ello debido principalmente a su variabilidad.
- La guadua posee mala resistencia a fuerzas perpendiculares a la fibra y a cizalladura paralela, y se debe evitar estos tipos de esfuerzos.
- Las guaduas sometidas a esfuerzos de flexión generalmente fallan por compresión perpendicular a la fibra en los puntos de apoyo y para que ello no ocurra las uniones deben ser correctamente diseñadas y construidas.
- La guadua posee una excelente resistencia a fuerzas de tensión y compresión axial, siendo mayor la primera; pero en la práctica es mayor la

²³ LÓPEZ, Luis Felipe; SILVA, Héctor Fabio. Diplomado Internacional Gestión Integral de la Guadua angustifolia. Universidad Tecnológica de Pereira. Febrero de 2009.

resistencia en compresión, puesto las uniones comúnmente realizadas inducen esfuerzos cortantes o fuerzas perpendiculares a la fibra.

- La guadua posee una excelente relación resistencia / peso. Factor muy importante para las construcciones sismorresistentes.
- La forma tubular y tamaño natural de la guadua le confiere una ventaja comparativa frente a otros materiales en propiedades como el momento de inercia, el radio de giro y la relación de esbeltez.
- Obtener guadua rolliza requiere de menor cantidad de energía que obtener una sección de madera de un árbol u obtener los minerales necesarios para formar un elemento de acero. Este hecho es otro punto a favor que la guadua cuenta como material de carácter ambiental.
- El manejo que se le da a la guadua, desde su corte, preservación, secado, acabado y protección por diseño, determina su resistencia a factores ambientales a los que es vulnerable y que inciden directamente sobre su durabilidad: sol directo, humedad, polvo, agua, hongos e insectos.
- Se necesita de un buen tratamiento y mantenimiento para asegurar la durabilidad de la guadua.

2.2. SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN EN GUADUA EXISTENTES

Las investigaciones realizadas en cuanto a estructuras en guadua siempre son centradas mayoritariamente en el desarrollo de la unión pues de ésta depende la resistencia total de la estructura y la facilidad, el tiempo de construcción y los costos. En el siguiente punto se expone una síntesis sobre el estado del arte en lo que respecta de la construcción en guadua.

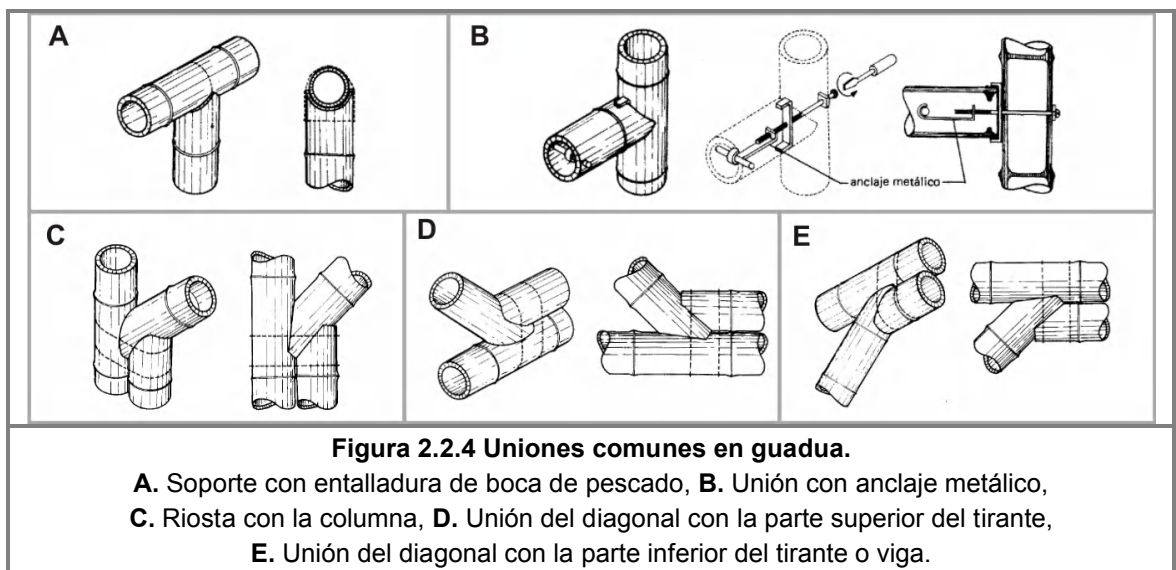
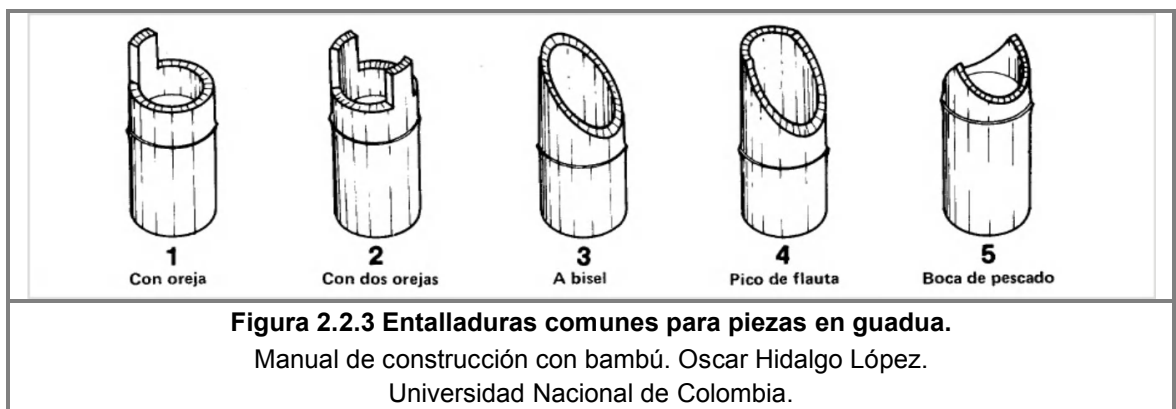
2.2.1 Estado del arte de la construcción con guadua. A continuación se expondrán algunos de los tipos de construcción que se han realizado en guadua.

- **Construcción tradicional en guadua.**



Las construcciones en guadua más comunes hoy en Colombia son realizadas de la siguiente manera:

La estructura básica de la edificación se realiza en guadua. Se realizan estructuras tipo cercha y/o columnas y vigas compuestas por varias guaduas. Las uniones entre los diferentes elementos de la estructura se realizan de diferentes maneras según convenga el constructor; se utilizan mayoritariamente uniones pernadas y uniones clavadas. Para realizar dichas uniones a los extremos de las guaduas se les debe hacer diferentes procesos artesanales que permitan su ajuste, como por ejemplo la boca de pescado (imagen 5 de la figura 2.2.3).



Para realizar las uniones existen y se utilizan diferentes herramientas comúnmente usadas para el trabajo de maderas. El desgaste de estas herramientas al ser utilizadas en la guadua es mucho mayor que al ser en maderas de coníferas o foliares debido a la alta presencia de sílice en la guadua. Las herramientas varían de constructor en constructor, existen diferentes herramientas para lograr el mismo objetivo; en la figura 2.2.5 se exponen algunas de las que se utilizan.



Los cerramientos o muros pueden realizarse de varias maneras. Una técnica es llamada muros tendinosos. Consiste en rellenar los espacios que deja la estructura en guadua revocando sobre una malla de vena, habiendo instalado previamente el sistema eléctrico y de aguas (imagen a la derecha de la figura 2.2.6).

Otra técnica consiste en cubrir la estructura de guadua con esterilla y sobre ésta ubicar una malla de pollo para luego revocar. Con esta técnica es posible ocultar las guaduas de la vista de manera que parezca una construcción común en mampostería.



Figura 2.2.6 Casa en guadua en etapa de construcción.



Figura 2.2.7 Construcciones en guadua en La Granja de la Mamá Lulú.

Muchas de las construcciones que existen hoy en Colombia no cuentan con un diseño apropiado y debido a esto es común encontrar construcciones de guadua en muy mal estado.

Ventajas:

- Construcción con gran capacidad sismo-resistente si es diseñada y construida adecuadamente.
- Precio bajo que oscila entre \$500.000 y \$1.000.000 el metro cuadrado.

Desventajas:

- Se necesita de personas que tengan un alto conocimiento en lo que respecta a la guadua para lograr una buena construcción. En general, construir con guadua es más difícil que construir con otro tipo de material.
- Alta demanda de mano de obra, causada principalmente por el tipo de uniones empleado.
- Necesita mantenimiento para asegurar su durabilidad.
- Construcción mucho menos pesada que la de mampostería tradicional.
- Construcción que demanda mucho tiempo debido a la gran cantidad de mano de obra requerida.

- **Bamboo Technologies.** Bamboo Technologies²⁴ es una empresa estadounidense que realiza construcción de casas prefabricadas en bambú. Las casas que ofrecen son generalmente de un solo piso. La estructura es realizada en bambú con uniones platinadas como muestra la figura 2.2.9. Han realizado ensayos de uniones con madera en las que ha participado el holandés Oscar Antonio Arce Villalobos (imagen de la derecha en la figura 2.2.9)



Figura 2.2.8 Algunas casas que ofrece Bamboo Technologies.



Figura 2.2.9 Algunas uniones de Bamboo Technologies.



Figura 2.2.10 Proceso de construcción, Bamboo Technologies.

Las casas son construidas previamente en una bodega, se desarman, y son transportadas en paquetes al lugar donde se instalará.

Ventajas:

²⁴ <http://www.bambootechnologies.com>

- Es una construcción liviana y fácil de realizar que les permite edificar las casas en cualquier país a domicilio.
- Construcción que se realiza de manera prefabricada permitiendo instalarse rápidamente.

Desventajas:

- La resistencia de este tipo de construcción es tan baja que solo permite la construcción de casas de una sola planta y sus muros deben ser cuidados de los golpes. Generalmente son solicitadas como casas de recreo.
 - Durabilidad cuestionable.
 - Solo se ofrecen unas viviendas específicas.
 - Demanda mucha mano de obra en el prefabricado.
- **Uniones con mortero de concreto y barras longitudinales.** El arquitecto colombiano Simón Vélez desarrolló un tipo de unión utilizando morteros de concreto en el interior de las guaduas que unen barras longitudinales y éstas luego articulan en apoyos



Figura 2.2.11 Unión con mortero de concreto y barras axiales. Simón Vélez.

Con esta técnica, Simón Vélez y su equipo, han realizado las construcciones más grandes del mundo hechas en bambú guadua. El Pabellón ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives) que se realizó para el Expo Hannover 2000 de Alemania y del cual se realizó un prototipo previo en las afueras de Manizales en un lugar llamado El Recinto del Pensamiento ²⁵; en el cual las pruebas demostraron una resistencia mayor a 400 kilos por metro cuadrado. La extinta Catedral de Pereira. La Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). El museo del

²⁵ <http://www.recintodelpensamiento.com/recinto/>

Zócalo en Ciudad de México; estructura temporal de tres naves y 5130 metros cuadrados. Se han construido también las más lujosas residencias y resorts e incluso un prototipo de tienda para la cadena francesa Carrefour de dos mil metros cuadrados y un techo de 16 metros de alto. Se encuentra ahora finalizando el desarrollo de un prototipo de un nuevo pabellón para el museo nómada “Ashes and Snow” que se realizará en el año 2009 en Brazil.

Ventajas:

- Sistema de construcción respaldado por pruebas reales sobre prototipos a escala real.
- El reconocimiento y reputación mundial del arquitecto Simón Vélez le permite realizar obras de gran escala.

Desventajas:

- No se logra aprovechar el potencial de la guadua con dicha unión y ésta posee una resistencia muy baja en fuerzas tracción. No se recomienda aplicar cargas de tensión superiores a 10 KN por culmo y por ello la estructura debe ser sobre dimensionada con gran cantidad de guaduas y utilizar otros elementos que funcionen a tracción.
- El mortero y la guadua se comportan de forma distinta con respecto a la humedad o la temperatura (poseen coeficientes de expansión térmica y contracción e hinchazón por la humedad muy diferentes); generalmente ocurre que el mortero se afloja en el interior de la guadua reduciendo la resistencia de la unión. Aún no se ha estudiado como es el comportamiento químico de la guadua frente al cemento y quizás existan efectos negativos.
- Requiere de gran cantidad de mano de obra; cerca del 80% de los costos involucrados son mano de obra.
- Requiere de largos tiempos de construcción.

- **Uniones con mortero de concreto y pernos.** El carpintero alemán Jörg Stamm ²⁶ aprendiendo del lado de Simón Vélez se ha especializado en la construcción de puentes con grandes luces, con resultados satisfactorios hasta 40 metros de luz. Realiza uniones de la manera tradicional, realizando entalladuras y uniéndolo con pernos pasantes, y adiciona morteros de concreto en el interior de los segmentos de guadua que dan con dichas uniones.



Figura 2.2.12 Unión con mortero de concreto y pernos pasantes. Jörg Stamm.

Ventajas:

- Sistema de construcción respaldado por pruebas reales.
- El reconocimiento y reputación mundial Jörg Stamm le permite realizar obras de gran escala.
- Todos los materiales utilizados son de bajo costo.

Desventajas:

- No se logra aprovechar el potencial de la guadua con dicha unión.
- El mortero y la guadua se comportan de forma distinta con respecto a la humedad o la temperatura (poseen coeficientes de expansión térmica y contracción e hinchazón por la humedad muy diferentes); generalmente ocurre que el mortero se afloja en el interior de la guadua reduciendo la resistencia de la unión. Aún no se ha estudiado como es el comportamiento químico de la guadua frente al cemento y quizás existan efectos negativos.
- Requiere de gran cantidad de mano de obra y gran parte de los costos son debido a esto.
- Requiere de largos tiempos de construcción.

²⁶ <http://www-users.rwth-aachen.de/Christoph.Toenges/pagesES/bauwerke.html> y <http://www.ecobamboo.net/>

- **Peajes autopista del café.** La Concesión Autopistas del Café S.A.²⁷ ha implementado un modelo constructivo desarrollado por el arquitecto Simón Hossie para los peajes de la vía; el peaje de Pavas, en el departamento de Caldas; Circasia, en el departamento del Quindío; y próximamente en Corozal, departamento del Valle. El modelo fusiona materiales como el concreto, el acero, el vidrio y la guadua con gran atractivo visual.



Figura 2.2.13 Peajes Autopistas del Café.

Ventajas:

- Sistema de construcción con un diseño que le brinda alta durabilidad.
- Buena estética.

Desventajas:

- La unión está diseñada de manera que las guaduas solo reciban fuerzas de compresión, las fuerzas de tensión las reciben mayoritariamente las barras de acero. Las barras de acero serían necesarias en mucha menor medida si la unión funcionara a tensión.

- **Unión Conbam.** Las uniones pernadas y clavadas tienen el problema de que no aprovechan al máximo la capacidad mecánica de la guadua pues ésta tiende a rajarse por donde fue perforada para pasar los pernos o clavos y lo hace mucho antes de llegar a la resistencia teórica de la guadua. Pensando en resolver esto y recopilando una idea de C.H. Duff (ver figura 2.2.15), Christoph Tönges de

²⁷ <http://autopistasdelcafe.com>

la Universidad RHTW-Aachen de Alemania y la empresa europea Conbam ²⁸ desarrolló un tipo de unión. CHDuff reportó una resistencia de 27 KN en tensión para una guadua de 64mm de diámetro.



Figura 2.2.14 Estructuras con unión Conbam.

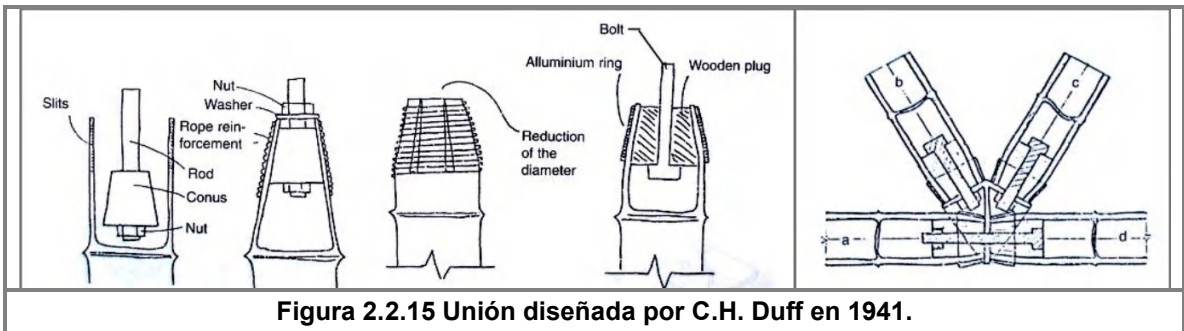


Figura 2.2.15 Unión diseñada por C.H. Duff en 1941.

La unión consiste en volver cónica los extremos a la guadua. Para ello se realizan unos cortes triangulares, luego se cierra para que la punta quede de manera cónica, se ubica un elemento metálico y se fija enrollando una fibra de vidrio impregnada en alguna resina polimérica como el poliéster. La guadua resultante entra a formar parte de una estructura, uniéndose a otras mediante unas uniones metálicas especiales hechas de platinas; ver figura 2.2.16. De esta manera la guadua no tiende a rajarse y se aprovecha muy bien su fortaleza.



Figura 2.2.16 Fabricación de la unión Conbam.

²⁸ <http://www.conbam.de>

Ventajas:

- Construcción sismo-resistente.
- Mejor aprovechamiento mecánico de las guaduas gracias al tipo de unión.
- Tiempo de construcción rápido gracias a que las terminales de las guaduas son prefabricadas.
- Las estructuras se pueden armar y desarmar permitiendo realizar estructuras temporales como stands y mejorando el mantenimiento.
- Construcción liviana que permite realizarse en terrenos de poca resistencia y baja las especificaciones en cimentación.

Desventajas:

- Alta necesidad de mano de obra en las uniones prefabricadas y alta dificultad para realizarlas.
 - Necesita de mucho tiempo en la parte de prefabricación.
 - Mayores costos que la construcción tradicional en guadua pues requiere de mucha mano de obra y materiales más costosos.
-
- **Bamboo Space.** Bamboo Space ²⁹ es una empresa que se dedica al diseño arquitectónico, cálculo estructural y construcción de obras civiles. Dentro de su visión empresarial está generar un desarrollo sostenible en la construcción de estructuras de larga duración y debido a esto se ha enfocado en construir con guadua.

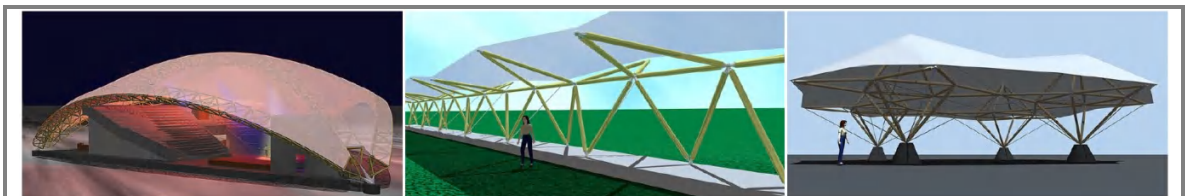


Figura 2.2.17 Diseños de Bamboo Space. Por Tim Obermann.

²⁹ <http://www.bamboo-space.info>



A través de una investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y la Universidad Tecnológica de Berlín - Alemania, desarrollaron un tipo de unión que permite la construcción de estructuras espaciales. A partir de la unión desarrollada se construyó un prototipo llamado El Pabellón Mariposa en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, su montaje demoró dos semanas; ver figura 2.2.18.



La unión consiste en dos piezas; ver figura 2.2.19. Un tubo de acero con un diámetro de 9 cm y 30 cm de largo que entra 20 cm en la guadua y se une a ella a través de varios pasadores perpendiculares; el extremo del tubo tiene una forma cónica con una apertura elíptica que permite colocar un tornillo para conectarse con una esfera de acero que tiene un diámetro de 10cm y que ofrece hasta 16 roscas en ángulos espaciales. Dichas esferas tridimensionales existen comercialmente en el mercado.

Utilizan guaduas de un diámetro exterior mínimo de 12cm con espesores de pared promedios de 15mm y diámetros interiores de 9cm. En la unión utilizan seis

pernos pasantes de 9mm, logrando un máximo de 60KN en fuerzas axiales de compresión o tensión, aunque recomiendan fuerzas admisibles hasta de 30KN.

Ventajas:

- Construcción sismo-resistente.
- Buen aprovechamiento mecánico de las guaduas gracias al tipo de unión.
- Tiempo de construcción rápido gracias a que las terminales de las guaduas son prefabricadas.
- Las estructuras se pueden armar y desarmar permitiendo realizar estructuras temporales como stands y mejorando el mantenimiento.
- Construcción liviana que permite realizarse en terrenos de poca resistencia y baja las especificaciones en cimentación.

Desventajas:

- Alto costo debido a los materiales utilizados en la unión en especial las esferas universales.
 - Alta necesidad de mano de obra en las uniones prefabricadas aunque de baja dificultad.
-
- **Otros sistemas a mencionar.** El italiano Renzo Piano ha realizado unión de bambús con platinas soldadas; El japonés Shoei Yoh utilizó uniones con platinas y dos pernos pasantes por extremo; Christoph Tönges realizó un ensayo intentando lograr un tipo de unión que aprovechara mejor las propiedades mecánicas de la guadua y utilizando materiales de bajo costo y de fácil consecución en el mercado; ver figura 2.2.20. La forma cónica se logró realizando cortes longitudinales con motosierra, se incorporó una abrazadera de alta carga y mortero de concreto con una barra corrugada de hierro. El ensayo sobre esta unión no tuvo buenos resultados.



Figura 2.2.20 Otros tipos de unión según el autor.

A. Unión con platinas de Renzo Piano, **B.** y **C.** Unión con platinas de Shoei Yoh, **D.** y **E.** Prototipo de unión cónica con mortero.

En la figura 2.2.21 aparece una unión de una empresa colombiana llamada GuaduaTech³⁰. Para realizar dicha unión, en la punta de la guadua deben realizarse unos cortes triangulares para darle forma cónica; este proceso requiere de mano de obra especializada. Se desconoce su resistencia y su costo. La unión brinda una apariencia estética muy buena.



Figura 2.2.21 Unión cónica abrazando con cable metálico.

En la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, en 1981 se realizó una tesis por W. Carvajal, W. Ortegón y C. Romero en la que se desarrollaron cerchas warren con latas de guadua (ver las tres imágenes de la izquierda de la figura 2.2.22). Las cerchas tienen entre 40 y 50 centímetros de alto y funcionan bien sosteniendo tejas de aluminio en luces no mayores a 3 metros.

En la misma universidad, en 1982 se realizó otra tesis por J. Carrasco, J. Junco y J. Quiroga en la que se desarrollaron cerchas warren de sección triangular con latas de guadua (ver imagen de la derecha de la figura 2.2.22). El alto de la cercha debe ser por lo menos 1/8 del largo de la luz a cubrir.

³⁰ <http://www.guaduatech.com>



Figura 2.2.22 Cercha Warren con latas de bambú.

Oscar Hidalgo López, trabajando como consultor de las Naciones Unidas en Ecuador realizó una serie de viviendas de interés social Guayaquil sector Guasmo. Las casas fueron construidas sobre cimientos de concreto reforzado con guadua (ver figura 2.2.23) en el año 1983 y hasta el año 2000, en que Hidalgo volvió a visitar el lugar, no se observó ninguna grieta o anomalía sobre las casas.

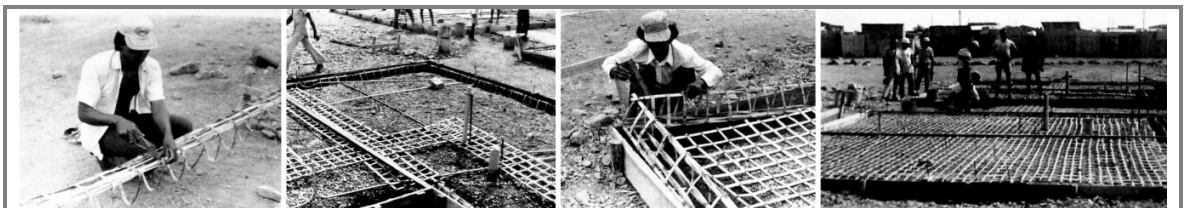


Figura 2.2.23 Cimientos de concreto reforzado con guadua. Guayaquil, Ecuador.

Las casas que se erigieron sobre dichos cimientos constaban de paneles prefabricados en guadua, luego eran ensamblados y empañetados con concreto como si se tratase de una construcción de bahareque encementado (figura 2.2.24)

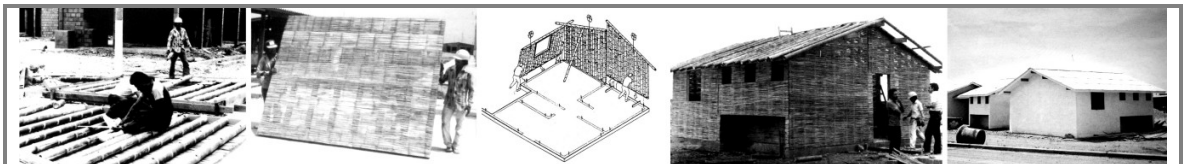
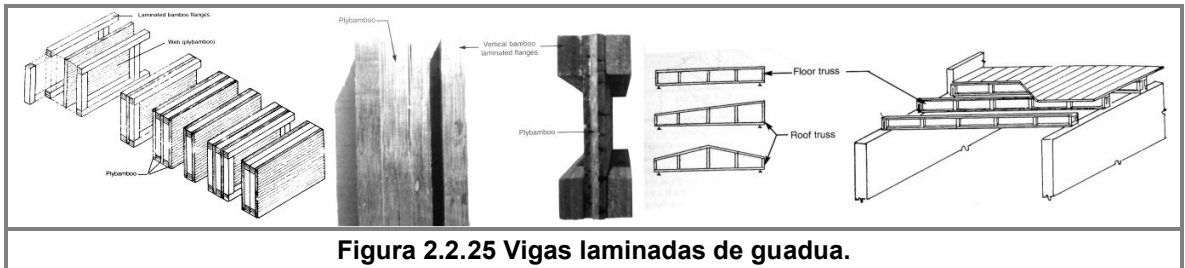


Figura 2.2.24 Casas fabricadas con paneles prefabricados en guadua rolliza y esterilla.

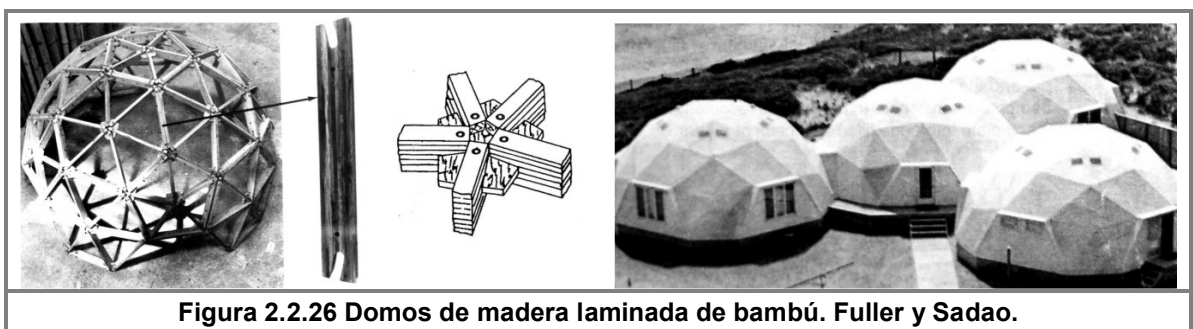
Se han realizado investigaciones para la aplicación de guadua laminada en la fabricación de vigas para pisos y techos (ver figura 2.2.25). A medida que crece la conciencia ambiental mundial, las maderas finas van pasando a ser reemplazadas

por alternativas sostenibles como la de las vigas en guadua laminada. Al parecer, su baja demanda hoy en día las hace poco viables económicamente.



Los arquitectos y diseñadores Fuller y Sadao diseñaron domos geodésicos (Derechos de copia por Popular Science Publishing Co Inc, 1972) cuya estructura consta de partes laminadas en bambú (ver figura 2.2.26). La estructura es fácil de armar y puede ser usada para casas, fabricas, teatros y demás.

Se ha estudiado el uso de la deformación artificial de los culmos de guadua para la aplicación en estructuras. Consiste en ubicar unas formaletas con formas especiales (según el efecto que se desee lograr) en el primer brote de la guadua, para que ésta crezca siguiendo la forma de la formaleta. Se pueden obtener guaduas curvas que pueden ser utilizadas para la construcción de casas, galpones y similares (ver figura 2.2.27); también obtener guaduas con múltiples curvas para la fabricación de vigas con cerchas warren (ver figura 2.2.28); u obtener guaduas de sección cuadrada para diferentes aplicaciones entre las cuales se encuentra la obtención de latas para laminados que optimiza el uso de material (ver figura 2.2.29).



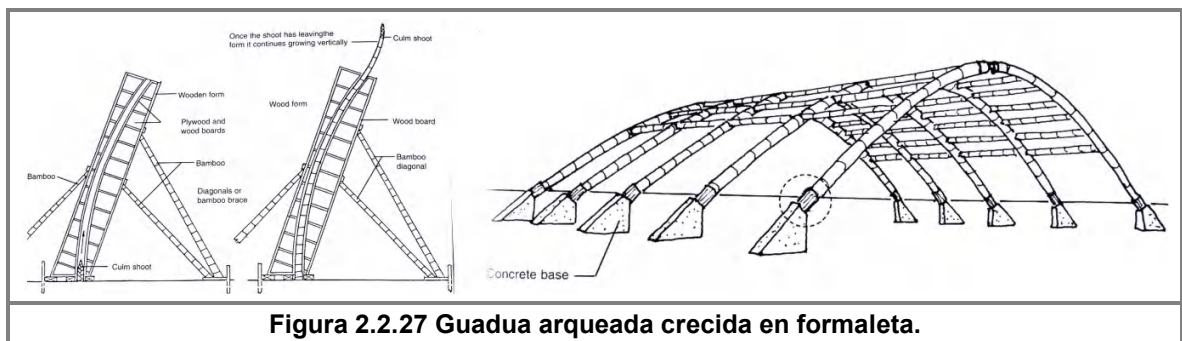


Figura 2.2.27 Guadua arqueada crecida en formaleta.

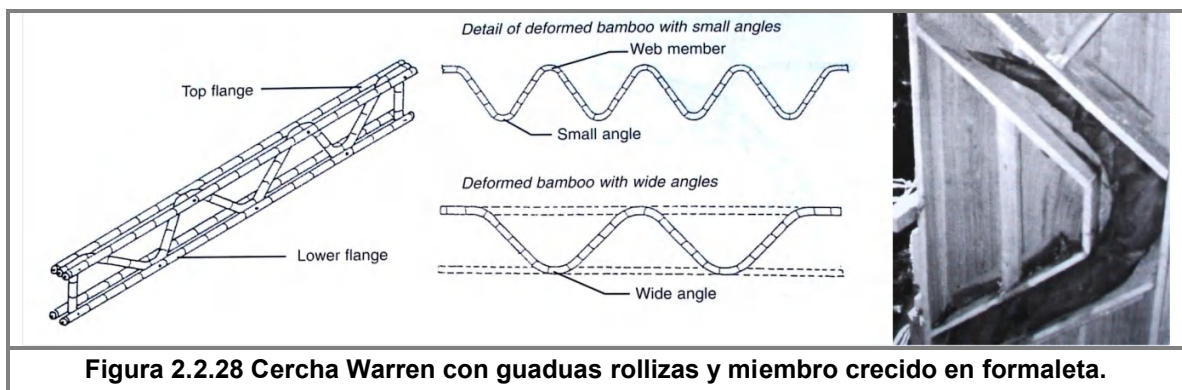


Figura 2.2.28 Cercha Warren con guaduas rollizas y miembro crecido en formaleta.



Figura 2.2.29 Bambú de sección cuadrada crecido en formaleta.

En el concurso internacional de construcción en bambú realizado en el año 2007³¹ se expusieron algunos diseños de uniones en bambú interesantes como la de los arquitectos canadienses Mehran Gharaati y Andi Struga. Ver figura 2.2.30. La unión pretende lograr la máxima resistencia sin perforar el bambú.

³¹ <http://www.bamboocompetition.com/spages/1469-10.html>

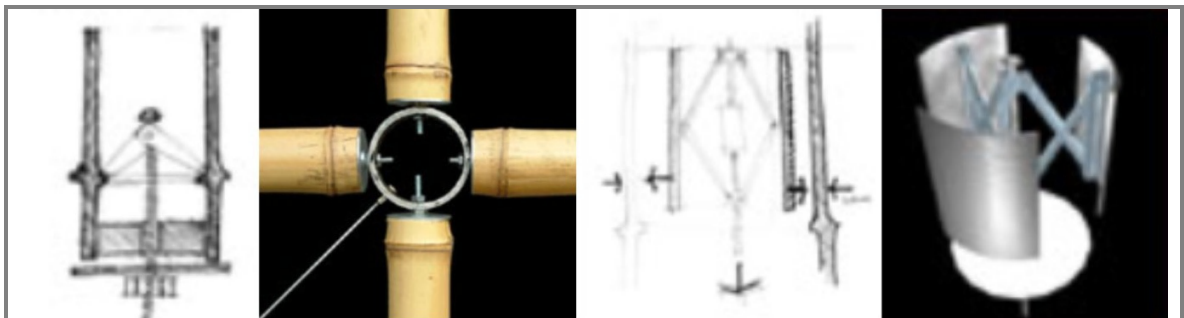


Figura 2.2.30 Diseño de unión de Mehran Gharaati y Andi Struga.

En la Universidad Nacional de Colombia se han realizado diversas tesis en lo concerniente con la guadua para su uso en construcción. A continuación se mencionan algunas propuestas de uniones interesantes.

La tesis de Cesar Peña y Hugo Rodríguez ³² propone una unión que consta de un pasador roscado de $\frac{1}{2}$ ", dos láminas cold rolled circulares calibre 18 adheridas cada una a la guadua con 8 clavos de $\frac{1}{8}$ " por 1" de largo perforando la guadua previamente; ver figura 2.3.31. Su resistencia máxima promedio de las uniones ensayadas fue de 4748Kg a tensión.

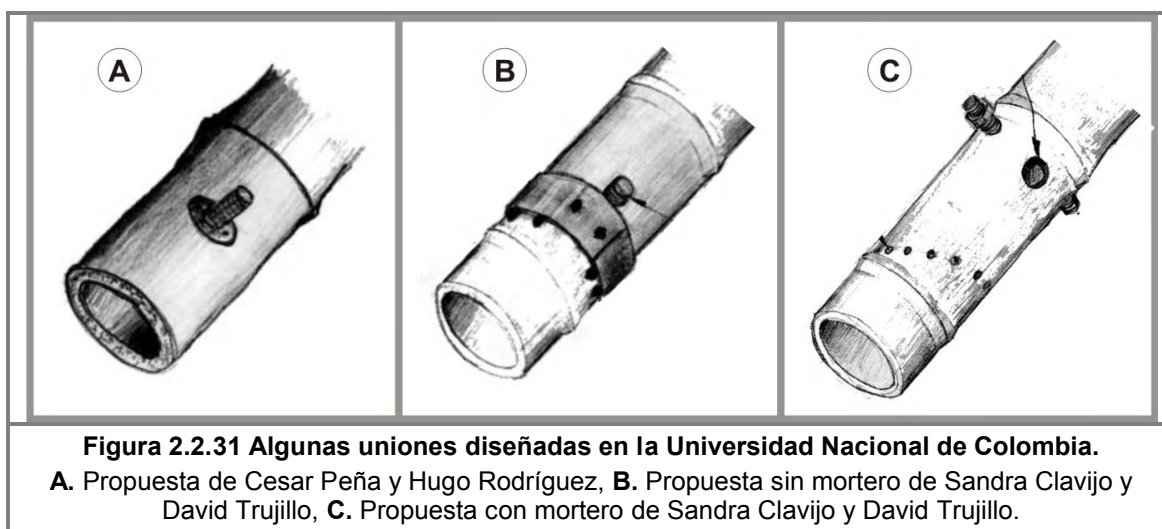
La tesis de Sandra Clavijo y David Trujillo ³³ propone dos tipos de unión, una con uso de mortero y otra sin su uso. La segunda es una unión tipo abrazadera que consiste en una lámina cold rolled calibre 22 de 4cm de ancho que le da 5 vueltas a la guadua y se apoya por un lado a un pasador roscado de $\frac{5}{8}$ " de diámetro y por el otro a 8 tornillos de $\frac{1}{4}$ " x 1" y hay 4 tornillos más que atraviesan la lámina; ver figura 2.2.31. Su resistencia máxima promedio de las uniones ensayadas fue de 9648Kg a tensión.

El otro tipo de unión propuesto por Clavijo y Trujillo. Consiste en la ubicación de varillas lisas de $\frac{1}{4}$ " que atraviesan la guadua en el sentido perpendicular de la fibra y un pasador roscado de $\frac{5}{8}$ ", luego por una perforación de 1- $\frac{1}{4}$ " se inyecta

³² PEÑA, Cesar y RODRÍGUEZ, Hugo. Propuesta de Uniones Mecánicas para Estructuras de Guadua. Bogotá, 1997. Proyecto de Grado de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia.

³³ CLAVIJO, Sandra y TRUJILLO, David. Evaluación de Uniones a Tracción en Guadua. Bogotá, 2000. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

mortero; ver figura 2.2.31. Su resistencia máxima promedio de las uniones ensayadas fue de 5971Kg a tensión. Las propuestas de dichas tesis logran una resistencia superior a lo que se ha logrado hasta el momento.



2.2.2 Conclusiones sobre los sistemas de construcción en guadua.

- Las construcciones en guadua hoy son difíciles de realizar y requieren de conocimientos especializados y diversos sobre el material.
- La guadua es un material de construcción económico en comparación con otros comúnmente utilizados, pero los costos de construir con dicho material se elevan por mano de obra. Reducir la mano de obra podría aumentar la competitividad de las construcciones en guadua.
- Las construcciones más comunes en guadua utilizan uniones de baja resistencia y por ello deben utilizar gran cantidad de guaduas y otros materiales como el cemento, dando esto como resultado construcciones más pesadas de lo que podrían ser y que visualmente se ven sobrecargadas.
- No existen construcciones en guadua que permitan personalización de fachadas y diseños variados, lo cual representa una oportunidad para aprovechar.

- Los desarrollos e innovaciones en cuanto a resistencia, peso, tiempo de construcción, utilización de materiales y mano de obra para construcciones en guadua están determinados directa y principalmente por el tipo de unión utilizado.
- Diseñar un tipo de unión que aproveche la alta resistencia de la guadua a fuerzas axiales es un reto difícil de lograr debido a su forma, estructura y baja resistencia frente a fuerzas perpendiculares a la fibra.
- Existen uniones que aprovechan bien la resistencia de la guadua y permiten construcciones modulares, ensambles y desensambles, pero requieren de una etapa de prefabricación tediosa en mano de obra y/o altos costos.

2.3. GUADUA COMERCIAL

La Guadua es un género de plantas cañas endémicas de América, de la familia de las gramíneas (no es un árbol) y de la subfamilia del bambú. Colombia es el país americano en el cual se han conservado la mayor cantidad de guaduales. Hoy la mayoría de los guaduales en Colombia están ubicados la región del eje cafetero (ver tabla 4).

Tabla 4. Áreas de guaduales naturales y establecidos en Colombia.

Departamentos	Área natural (Ha)	Área plantada (Ha)	Total área en Ha
Caldas	5.875	320	6.195
Quindío	7.708	640	8.348
Risaralda	3.515	615	4.130
Tolima	2.895	1.326	4.221
Valle del Cauca	6.992	1.400	8.392
Subtotal eje cafetero	26.985	4.301	31.286
Cundinamarca	378	228	606
Antioquia	489		489
Putumayo y Caquetá	2.000		2.000
Cauca	1.500	300	1.800
Subtotal otros departamentos	4.367	528	4.895
Total país	31.352	4.829	36.181

Fuente: Libro *Guadua para todos: cultivo y aprovechamiento*.
CARDER. Francisco Castaño y Rubén Darío Moreno. 2004

2.3.1 Partes comerciales del culmo. Comercialmente, el culmo de la guadua se divide en cinco secciones: cepa, basa, sobrebasa, varillón y copa; ver figura 2.3.1. Generalmente, la cepa constituye los primeros 4 metros luego de la línea de corte, la basa los siguientes 6 metros, la sobrebasa los siguientes 4 metros, el varillón

los siguientes 4 metros y la copa el resto. La basa por lo general es la parte mas recta y que presenta menos conicidad (reducción en el diámetro). De la basa hacia arriba se presenta una reducción en el diámetro pronunciada que genera cilindros cónicos. La copa, las ramas y el follaje generalmente no son comercializados y se repican en el guadua como aporte de materia orgánica al suelo.

2.3.2 Empresas comercializadoras en Colombia y sus productos.

La guadua puede ser encontrada en los depósitos de materiales de la región del eje cafetero, pero la calidad de éstas generalmente no es la mas adecuada para utilizar como elementos de construcción. Existen empresas ubicadas en los departamentos de Risaralda, Quindío y Valle del Cauca, proveedoras de guadua comercial, tales como: Agroguadua, Asocateg, Bambukindus, Colguadua, Ecobamboo, Ecoguadua, e Induguadua.

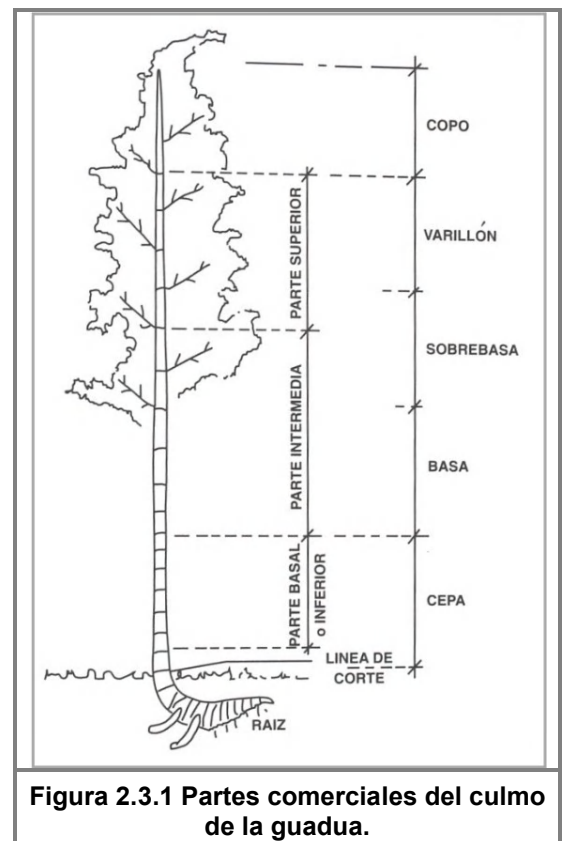
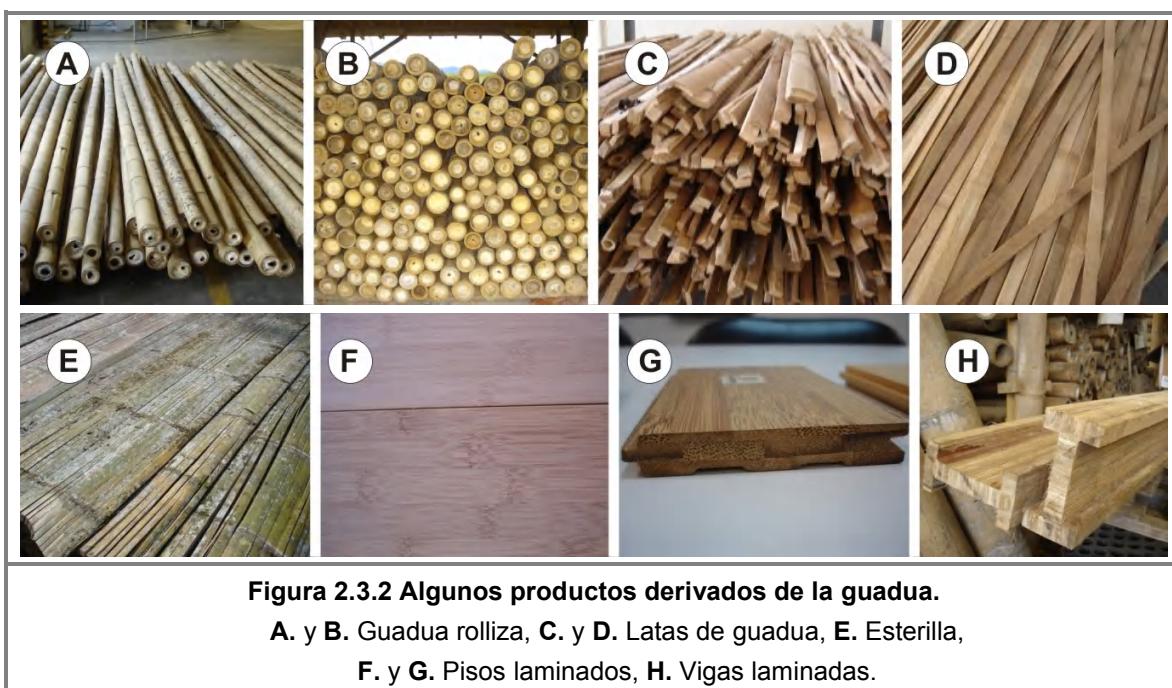


Figura 2.3.1 Partes comerciales del culmo de la guadua.

Según el proveedor y el pedido, ofrecen guadua preservada y secada de diferentes calidades. Comercializan guadua rolliza, esterilla, latas de guadua, pisos laminados, vigas y otros elementos estructurales laminados (Ver figura 2.3.2).

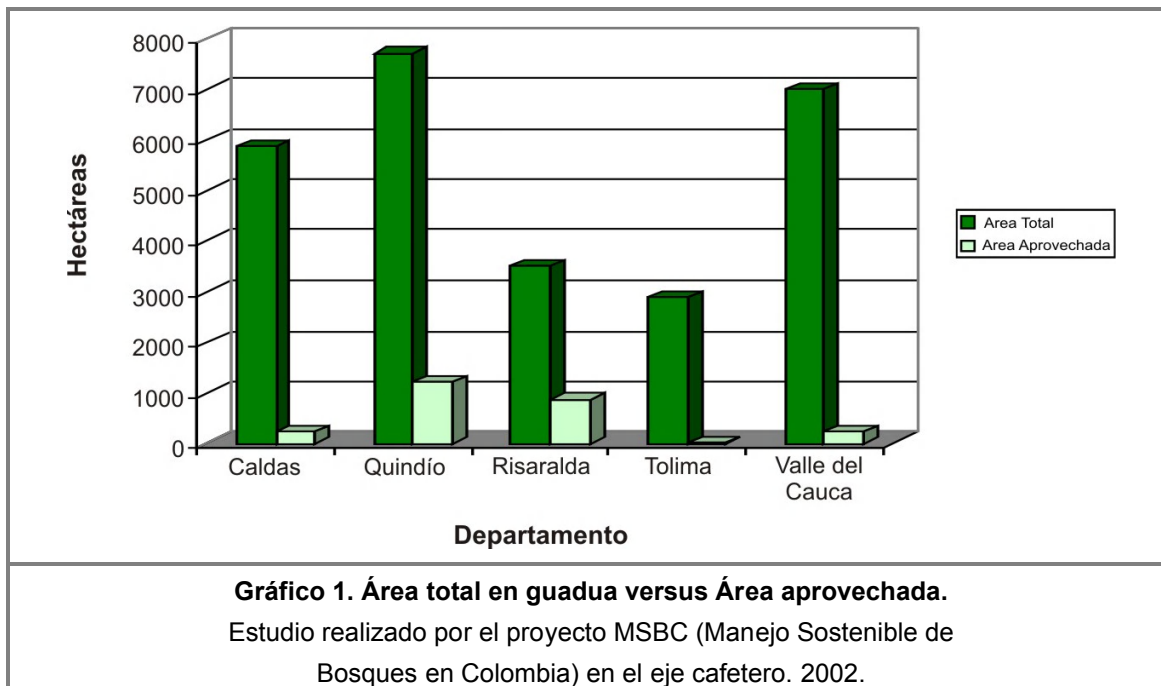
Venden guadua rolliza de diámetros entre 4 y 16 centímetros y largos de hasta 8 metros, aunque es más usual encontrar diámetros entre 10 y 12 centímetros y largos de 6 metros.

Generalmente preservan por inmersión en bórax perforando previamente de manera longitudinal los diafragmas. La mayoría seca al aire libre en perchas (burros), pero hay empresas que poseen secadores tipo invernadero, túnel u horno de caldera. Los precios para guadua rolliza preservada y seca oscilan entre 2600 y 6000 pesos el metro lineal, siendo \$4000 el precio más común.



Estas empresas ofrecen los tipos de productos derivados de la guadua mencionados anteriormente aunque por lo general no tienen en inventario, sino guadua rolliza solamente.

Según estadísticas de las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) entre el año 2000 y 2004 fueron cosechados 2.420.000 culmos de 2557 Ha (Moreno 2006), lo que quiere decir que cerca del 91% de las áreas bajo guadua no registran aprovechamientos (Zonificación Detallada del Recurso Guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca, Camargo et al 2006).



Aunque el potencial en volumen de producción de estas empresas y en general de la región del Eje Cafetero es grande, el verdadero volumen de producción es muy reducido y los tiempos de producción son largos. Esto debido principalmente a dos causas relacionadas entre si: alto costo de producción y baja demanda.



Algunas de las empresas poseen un alto conocimiento sobre el manejo de la guadua en todo su proceso, pero no tienen una buena administración. Otras poseen una buena administración, gran inversión en infraestructura y maquinaria pero no tanto conocimiento. Estas pequeñas empresas se convertirían en una gran empresa, aumentarían su considerablemente rentabilidad (la cual es muy baja hoy en día) y hasta podrían entrar a competir con empresas chinas del

mercado del bambú si realizaran alianzas estratégicas, pero para la cultura colombiana es difícil hacerlo.

2.3.3 Conclusiones sobre la guadua comercial.

- Las empresas que ofrecen guadua en Colombia y en general en todo el mundo son poco conocidas y no muy fáciles de encontrar.
- En Colombia existen muchos proveedores de guadua comercial ubicadas casi en su totalidad en la región del eje cafetero.
- Se puede encontrar y solicitar guaduas comerciales de casi cualquier diámetro y largo según se requiera (dependiendo de la cantidad), con diferentes procesos y acabados. Igualmente se pueden encontrar productos derivados de la guadua como los laminados en mucha variedad.
- En el ámbito de la construcción, los precios de la guadua procesada pueden considerarse como accesibles y competitivos según sea el caso.
- Las empresas comercializadoras de guadua en Colombia tienen una baja capacidad de reacción ante un gran pedido.
- La demanda crece día a día quizás en mayor medida que el crecimiento de la producción.
- Hace falta que equipos interdisciplinarios se involucren con las empresas comercializadoras de guadua para aumentar su rentabilidad y competitividad.
- La guadua presenta unas condiciones climáticas específicas para su buen desarrollo, lo que significa que una plantación de guadua para aprovechamiento no puede ser establecida en cualquier lugar. El carácter ambiental de un proyecto constructivo ubicado en una región donde no exista producción de guadua puede no tener sentido debido a los gastos energéticos y contaminación en el transporte. Cada caso se debe analizar por separado.

3. DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN EN GUADUA

Habiendo esclarecido dudas generales mediante las investigaciones previas, se pasa ahora al proceso de diseño del nuevo sistema de construcción en guadua.

El presente capítulo presenta tres subdivisiones principales: comienza exponiendo el PDS del sistema constructivo en guadua, luego se presentan algunas de las alternativas iniciales que surgieron de una lluvia de ideas, enseguida se muestra la alternativa a desarrollar de manera definitiva. Sobre ésta última se generó su respectivo diseño de detalle, pruebas CAE (Análisis de elementos finitos) y pruebas de laboratorio.

3.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO (PDS) DEL DISEÑO CONSTRUCTIVO

En la Tabla 5 a continuación se muestran las Especificaciones de Diseño de Producto que se tendrán en cuenta para el desarrollo del sistema de construcción en guadua.

Tabla 5. Especificaciones de diseño de producto (PDS)

Elemento	Producto: Sistema de construcción con miembros estructurales de guadua		
	Deseos	Demandas	Requerimientos
Desempeño	Que sea rápido de construir	Que posea elementos prefabricados	Los miembros estructurales deben ser prefabricados El elemento de unión entre los miembros estructurales debe ser prefabricado
		Que el prefabricado sea fácil de realizar	El ensamble de las piezas debe requerir solo destrezas básicas, no artesanales Los procesos productivos requeridos para fabricar las piezas no deben ser complejos
		Que el prefabricado sea rápido	El ensamble de las piezas de una terminal de un miembro estructural no debe demorarse mas de 10 minutos
		Que la instalación en obra sea fácil	La instalación debe requerir solo destrezas básicas, no artesanales
			El ensamble en obra de miembros estructurales con los elementos de unión, debe hacerse por medio de pasadores o tornillos
			El ensamble en obra no debe requerir de soldadura o procesos similares que requieran de personal calificado
		Que la instalación en obra sea rápida	El ensamble entre un miembro estructural y el elemento de unión debe demorarse máximo 120 segundos
		Que los elementos sean de bajo peso	Las terminales de los miembros estructurales no deben pesar mas de 7Kg cada una
	Un miembro estructural de guadua con sus terminales no debe exceder los 28Kg		
	Un nodo no debe pesar mas de 8Kg		
	Que sea versátil	Que permita la instalación de cerramientos	La estructura debe permitir la ubicación de materiales para cerramiento lateral y cubiertas diferentes
		Que permita la configuración de estructuras con diferentes geometrías	Los elementos de unión entre los miembros estructurales deben permitir el ensamble en múltiples ángulos

Elemento	Producto: Sistema de construcción con miembros estructurales de guadua		
	Deseos	Demandas	Requerimientos
Desempeño	Que posea larga vida útil	Que dure tanto como cualquier otro tipo de construcción	Se debe seguir los numerales del punto "2.1.5 La durabilidad de la guadua" del presente trabajo
			Sus partes deben ser viables de reemplazar en cualquier momento
			La estructura debe ser correctamente diseñada para las cargas que va a recibir durante toda su vida
			Las piezas deben poseer un recubrimiento apropiado según el material del cual estén hechas
Seguridad	Que sea muy resistente a cargas	Que un miembro estructural sea muy resistente	Un miembro estructural estándar, con una guadua de 12cm de diámetro y dos metros de largo, debe resistir por lo menos 2 toneladas a compresión y a tensión
		Que los elementos de la estructura sean apropiados para las cargas que recibirán	Diseñar elementos estructurales (como columnas y vigas) para diferentes magnitudes de carga
		Que las estructuras sean correctamente dimensionadas para las cargas que recibirán	Norma NSR-98 Títulos A, B, G, J y otros que requiera según el caso específico
	Que posea un alto grado de sismo-resistencia	Que pese poco	Un miembro estructural de guadua con sus terminales no debe exceder los 28Kg Un nodo no debe pesar más de 8Kg
		Que siga la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente	Norma NSR-98 Títulos A, B, G, J y otros que requiera según el caso específico
	Que sea seguro en caso de fuego		Diseñar estructuras con los debidos cortafuegos
			El preservante utilizado en la guadua debe poseer propiedades retardantes del fuego
			Norma NSR-98 Título G (Edificaciones de madera) y Título J (Requisitos de protección contra el fuego en edificaciones)
Medio Ambiente	Que sea sostenible	Que utilice recursos renovables	Al menos el 60% de los materiales utilizados deben ser renovables
		Que aproveche los recursos nacionales	Al menos el 50% de los materiales utilizados deben ser nacionales
		Que utilice poco material	Utilizar materiales con buena relación resistencia-peso
			Realizar estructuras tipo cercha
		Utilizar materiales huecos	
Que sea eficiente energéticamente durante su vida	La estructura debe permitir la ubicación de materiales para cerramiento lateral y cubiertas diferentes		
Utilizar en mayor medida materiales de baja conducción térmica			

Elemento	Producto: Sistema de construcción con miembros estructurales de guadua		
	Deseos	Demandas	Requerimientos
Medio Ambiente	Que sea sostenible	Que requiera de poca energía para su realización	Utilizar guadua rolliza como material principal y racionalizar el uso de materiales pesados
			Utilizar solo la cantidad de material necesario para lograr la resistencia deseada
			Utilizar procesos racionalmente para la fabricación de las terminales de los miembros estructurales y los elementos de unión
Estética	Que se pueda personalizar su apariencia	Que permita diversas formas	Los elementos de unión entre los miembros estructurales deben permitir el ensamble en múltiples ángulos
		Que permita la instalación de cerramientos	La estructura debe permitir la ubicación de materiales para cerramiento lateral y cubiertas diferentes
		Que permita dejar la guadua a la vista	Las piezas deben poseer un recubrimiento que sea decorativo y a su vez sea apropiado para proteger el material
	Que las uniones diseñadas sean estéticas		La estructura debe permitir la ubicación de materiales para cerramiento lateral y cubiertas translúcidos
			Los elementos de unión deben tener una proporción adecuada en relación a la guadua
Mantenimiento	Que necesite poco mantenimiento	Requerir de mantenimiento con regularidad no menor a 2 años para una estructura con un uso normal	Los acabados de las uniones y los miembros deben ser adecuados
			Se debe seguir los numerales del punto "2.1.5 La durabilidad de la guadua" del presente trabajo
			Aplicarle a la guadua recubrimiento con protección a los rayos ultravioleta e impermeable
			Las piezas diseñadas no deben permitir el "empozamiento" de agua
	Que el mantenimiento sea fácil de realizar	Que no sea más complejo que el mantenimiento de una estructura metálica	Las partes metálicas debe tener algún proceso de recubrimiento electrolítico o de pintura
Costo	Que sea competitivo en costo frente a otras estructuras para el mismo uso	Que utilice materiales de bajo costo	El mantenimiento no debe requerir de habilidades artesanales
			El sistema debe utilizar a la Guadua como su material principal
		Que un miembro estructural de guadua no cueste más que un elemento de acero análogo en resistencia	El sistema debe utilizar, en lo posible, solo materiales comerciales
			La fabricación de una terminal de un miembro estructural no debe costar mas de \$20,000
	Un nodo no debe costar mas de \$80,000		

Elemento	Producto: Sistema de construcción con miembros estructurales de guadua		
	Deseos	Demandas	Requerimientos
Costo	Que sea competitivo en costo frente a otras estructuras para el mismo uso	Que los procesos productivos no sean costosos	Utilizar procesos productivos comunes en nuestro medio
		Que utilice poca mano de obra	Requerir solo destrezas básicas, no artesanales (Pocos movimientos finos)
			La fabricación de una terminal de un miembro estructural no debe demorarse mas de 10 minutos
			El ensamble entre un miembro estructural y el elemento de unión debe demorarse máximo 120 segundos
		Que los costos de transporte sean bajos	Un miembro estructural de guadua con sus terminales no debe exceder los 28Kg
			Un nodo no debe pesar mas de 8Kg
Que tenga bajo costo de mantenimiento	Un miembro estructural estándar, con una guadua de 12cm de diámetro y dos metros de largo, debe resistir por lo menos 2 toneladas a compresión y a tensión		
		Su mantenimiento debe consistir solo en aplicar nuevos recubrimientos	

3.2. ALTERNATIVAS INICIALES

A continuación se enumera una lista de posibles alternativas a desarrollar, de las cuales se elegirá solo una.

3.2.1 Alternativas que utilizan a la Guadua en su estado natural (rolliza):

1. Rediseño de unión tipo boca de pescado, pico de flauta y similares (ver figura 2.2.3 y 2.2.4) que reduzca la necesidad de mano de obra y los fallos por aplastamiento y/o rajaduras. Mediante estas uniones se formarían las columnas, vigas y arriostamientos necesarios de una edificación o se podrían armar paneles estructurales para conformar viviendas tipo bahareque encementado por ejemplo.
2. Desarrollo de unión que intente aprovechar al máximo las propiedades mecánicas de la guadua en estado rollizo, en especial su alta resistencia a fuerzas axiales. La guadua se convertiría en un miembro estructural estándar que entraría a formar parte de estructuras tridimensionales tipo cercha o columnas y vigas prefabricadas para otro tipo de estructuras.
3. Desarrollo de unión que utilice a la guadua como elemento para soportar principalmente solo compresión y la tensión la soporte otro elemento. De esta manera, como en el caso anterior, también se podrían formar miembros estructurales estándar.
4. Desarrollo de estructuras prefabricadas a partir de guaduas rollizas deformadas artificialmente (ver figuras 2.2.27 y 2.2.28).

3.2.2 Alternativas que utilizan a la Guadua en otro estado (laminada, en latas u otra):

5. Desarrollo de un sistema con columnas y vigas de guadua laminada (ver figura 2.2.25). Esta alternativa constituye una oportunidad que la guadua tiene para conformar elementos estructurales estandarizados.
6. Desarrollo de paneles prefabricados tipo tejidos canasta con latas de guadua para revocar con mortero en obra.
7. Desarrollo de estructuras tipo cercha prefabricadas en base a latas de guadua.

3.2.3 Evaluación de las alternativas iniciales. Las anteriores alternativas fueron evaluadas con base en las demandas significativas del PDS para decidir cual era la más apropiada de trabajar, ver la siguiente tabla:

Tabla 6. Evaluación de las alternativas iniciales de diseño

Demanda	Importancia (de 1 a 5)	Alternativa de diseño						
		1	2	3	4	5	6	7
Que el prefabricado sea fácil de realizar	5	3	3	5	1	1	1	1
Que el prefabricado sea rápido	5	3	3	3	1	1	1	1
Que la instalación en obra sea fácil	5	5	5	5	3	5	1	5
Que la instalación en obra sea rápida	5	5	5	5	5	5	1	5
Que pese poco	5	5	5	1	5	3	1	5
Que permita la instalación de cerramientos	3	3	5	5	1	1	1	3
Que permita la configuración de estructuras con diferentes geometrías	5	1	5	5	1	1	3	1
Que utilice recursos renovables	5	3	3	1	3	3	3	3
Que utilice poco material	5	5	5	1	5	5	1	5
Que requiera de poca energía para su realización	3	5	5	1	5	3	1	3
Que las uniones diseñadas sean estéticas	1	5	3	5	3	3	3	1
Que los procesos productivos no sean costosos	3	3	3	3	3	1	1	2
Que no cueste mucho	3	3	3	1	1	1	1	1
Que sea factible de realizar	5	3	5	5	1	1	1	1
Resultado		212	246	190	158	146	80	163

Alternativas de diseño evaluadas:

- 1: Rediseño de unión tipo boca de pescado y similares
- 2: Diseño de unión que aproveche al máximo la resistencia de la guadua
- 3: Diseño de unión que utilice a la guadua solo para fuerzas de compresión
- 4: Desarrollo de estructuras a partir de guaduas rollizas deformadas artificialmente
- 5: Desarrollo de un sistema con columnas y vigas de guadua laminada
- 6: Desarrollo de tejidos con latas de guadua para revocar con mortero en obra
- 7: Desarrollo de estructuras tipo cercha prefabricadas con latas de guadua

3.3. ALTERNATIVA A DESARROLLAR

Según la anterior evaluación, se eligió el siguiente punto a tratar:

- Desarrollo de unión que intente aprovechar al máximo las propiedades mecánicas de la guadua en su estado natural rollizo, en especial su alta resistencia a fuerzas axiales.

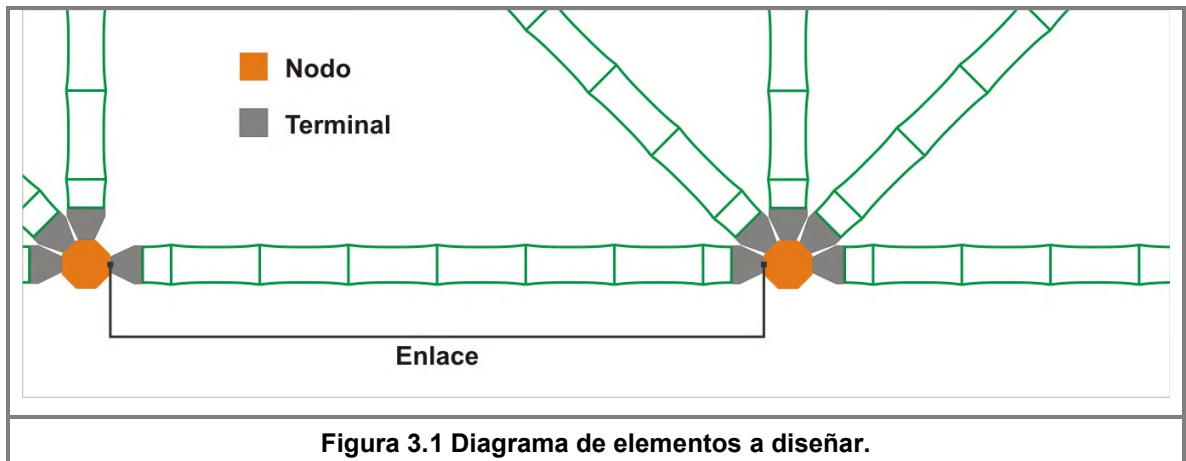
Como se mencionó en capítulos anteriores, la guadua posee un potencial de resistencia a fuerzas axiales y de flexión extremadamente alto. Hasta el momento, en la práctica no se logra dicha resistencia teórica, debido a que las uniones transforman las fuerzas anteriormente mencionadas en esfuerzos de corte paralelo a la fibra y de compresión y tensión perpendicular a la fibra, esfuerzos sobre los cuales la guadua no posee una resistencia significativa; mas adelante se ilustrará claramente este hecho.

Además de la resistencia, el tipo de unión entre guaduas, determina directamente los costos y el tiempo de construcción.

El diseño de la unión se centra en dos elementos principales: el elemento que agarra el extremo de la guadua, y el elemento de unión entre las terminales de diferentes guaduas (a los que se llamará “terminal” y “nodo” respectivamente). De esta manera, la guadua en conjunto con sus dos terminales, se convertiría en un miembro estructural estándar (el cual se llamará “enlace”) que podría entrar a formar parte de diferentes tipos de estructuras, como por ejemplo cubiertas con grandes luces ya sean monocapa o estructuras espaciales (ver glosario), o formar columnas y vigas prefabricadas para otro tipo de estructuras.

En la figura 3.1 se puede visualizar las partes en las que se enfocará el diseño y

los términos específicos a emplear en el proyecto, con el fin de hacer mas clara la lectura del mismo.



3.3.1 Alternativas de diseño de Enlace.

Partiendo de la idea de que, para aprovechar al máximo las propiedades mecánicas de la guadua, la terminal se debe sostener de sus superficies y paredes y hay que evitar en lo posible, realizar perforaciones en ella. Además la unión debe ser lo suficientemente estable dimensionalmente, para no deformarse y evitar transformar fuerzas axiales en esfuerzos de corte paralelo a la fibra o de compresión y tensión perpendicular a la fibra, pues la guadua posee muy baja resistencia a éstos.

Se pensaron varias maneras de lograr lo anterior:

- 1. Enlace con terminales tipo Contracción Verde.** La idea es aprovechar la contracción que realiza la guadua mientras reduce su contenido de humedad (mientras se seca). La terminal consta de un inserto metálico especial que se introduce en el interior de la guadua rolliza en estado húmedo, que se ajusta luego, a medida que la guadua se contrae (ver figura 3.2).

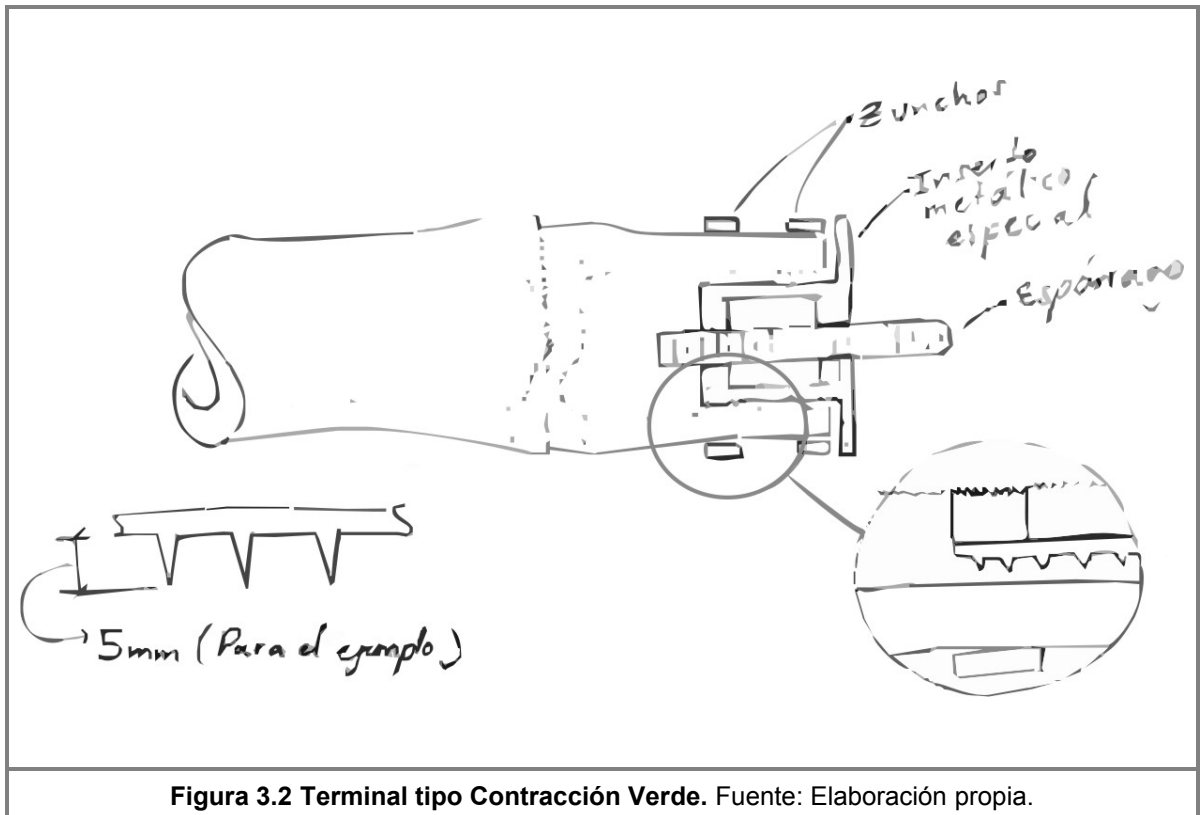


Figura 3.2 Terminal tipo Contracción Verde. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los problemas que posee este tipo de terminal es que la fuerza de tensión se realiza desde la parte interna del canuto, la cual es la parte menos densa y resistente debido a su mayor contenido de parénquima y menor contenido de fibra; existe una posibilidad grande de que ocurra un deslizamiento del inserto metálico.

Otro problema es que predecir con buen grado de precisión la contracción de la guadua no es posible y se corre el riesgo de que la unión quede floja o que ocurran rajaduras. Por esta razón, este tipo de terminal no es factible de realizar para el presente proyecto.

2. Enlace con terminales tipo Universal Apriete. La terminal aprieta las paredes de la guadua mediante tornillos que acercan entre si unas platinas especiales (ver figura 3.3).

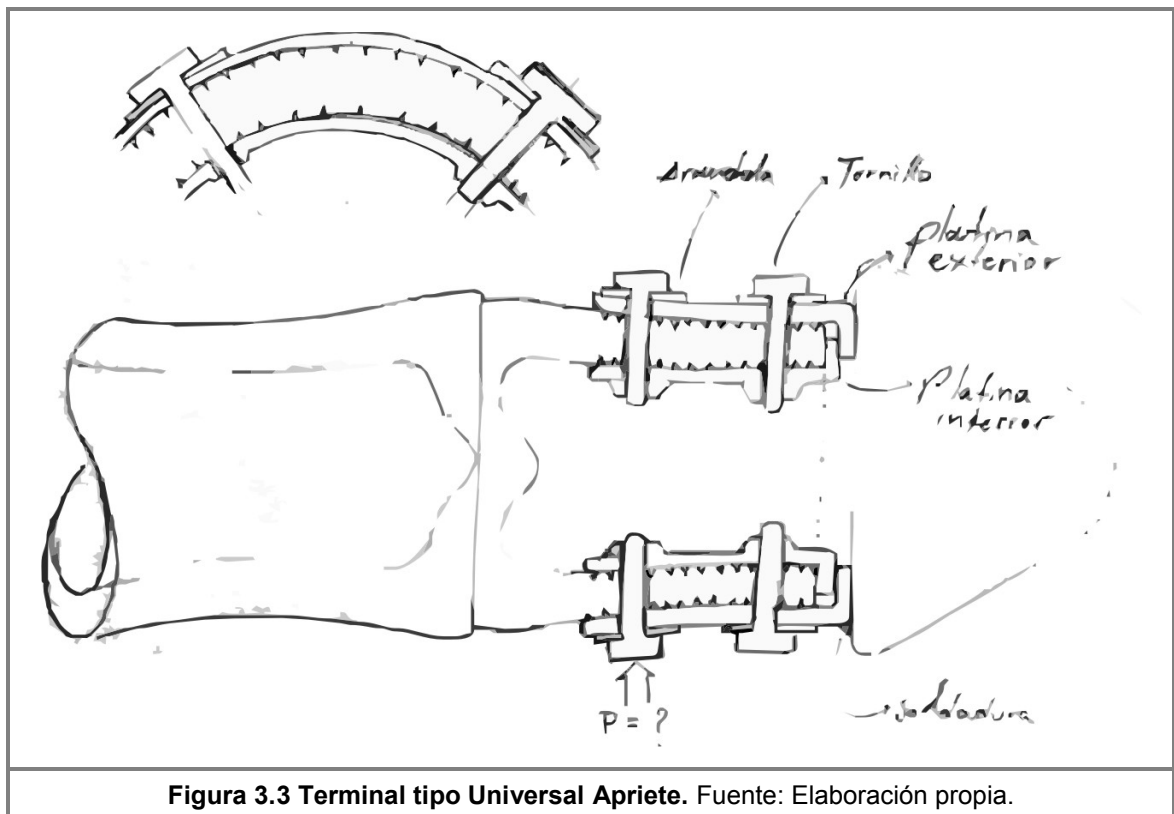


Figura 3.3 Terminal tipo Universal Apriete. Fuente: Elaboración propia.

La idea es que las platinas especiales posean superficies dentadas que agarren las paredes de la guadua como si se tratara de una máquina de ensayos universal.

Una desventaja que posee este tipo de terminal es que se perforan las paredes de la guadua rolliza reduciendo el área efectiva de resistencia de la misma y aumentando el riesgo de rajaduras.

Su ventaja radica en que la fuerza de tensión puede ser transferida homogéneamente entre la parte interna y la externa de la guadua rolliza; se piensa que esta alternativa posee un gran potencial de resistencia.

3. Enlace con terminales tipo Universal Abrazadera. Consta de un relleno en el interior del canuto y aprieta las paredes de la guadua mediante abrazaderas (ver figura 3.4).

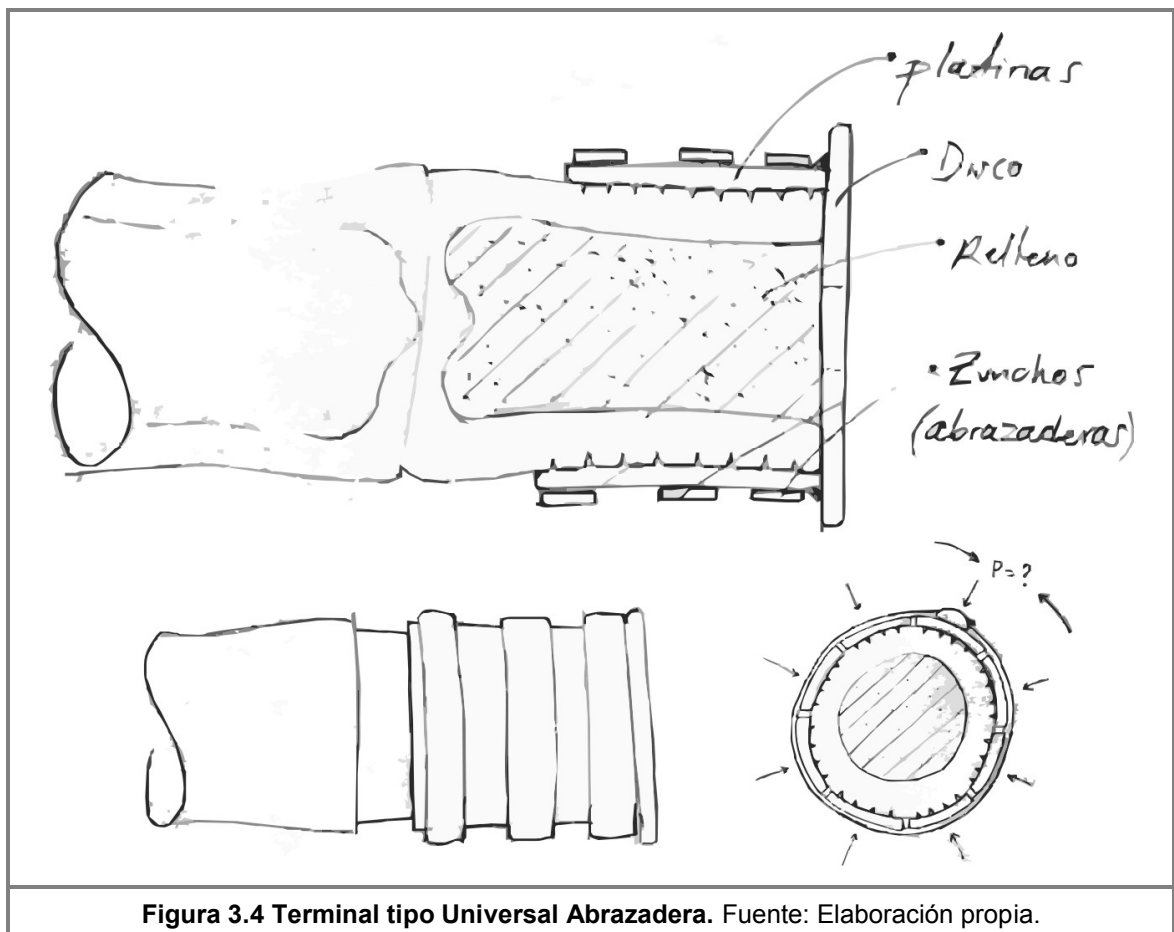


Figura 3.4 Terminal tipo Universal Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.

Para un buen desempeño de esta terminal se debe emplear un material de relleno con buena resistencia a la compresión y que efectivamente ocupe todo el espacio interior del canuto de la guadua, además de que no realice contracciones durante su fraguado para no dejar espacios libres.

4. Enlaces con terminales tipo Mecanismo. Aprietan las paredes de la guadua mediante mecanismos (ver figuras 3.5 a 3.8). A continuación se muestran diferentes tipos de mecanismos.

Las terminales de la figura 3.5 constan de una especie de diafragma que se expande apretando las paredes de la guadua. La del lado izquierdo de la figura, afloja el apriete en las paredes de la guadua al someter el espárrago a tensión,

mientras que la del lado derecho aprieta más al hacerlo, lo cual se piensa que puede ser mejor.

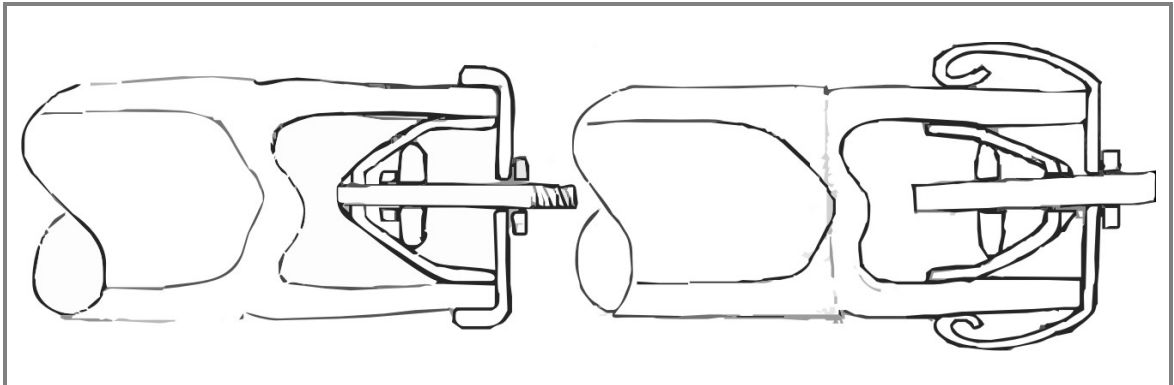


Figura 3.5 Terminales tipo Mecanismo “Diafragma expansible”. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.6 se muestra una propuesta que no tuvo una solución tridimensional (en dos dimensiones se ve posible pero en tres dimensiones es complicado). Esta trataba de lograr también que al someterse a tensión se apretaran más las paredes de la guadua.

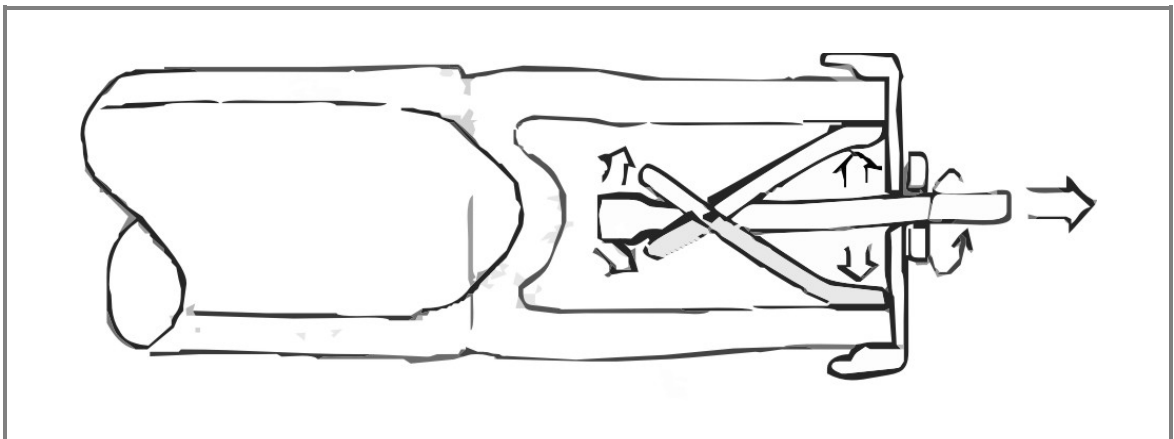
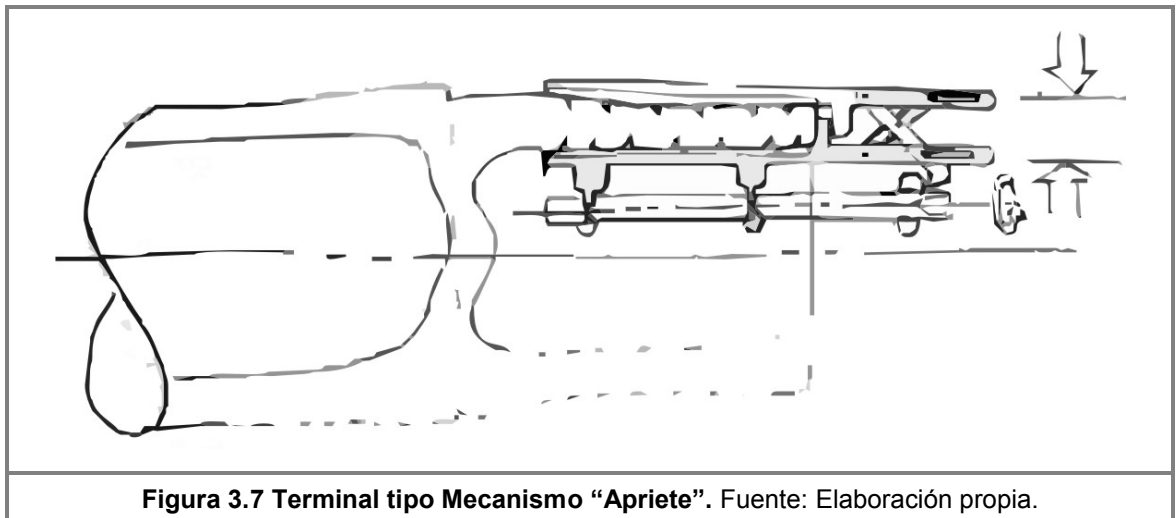
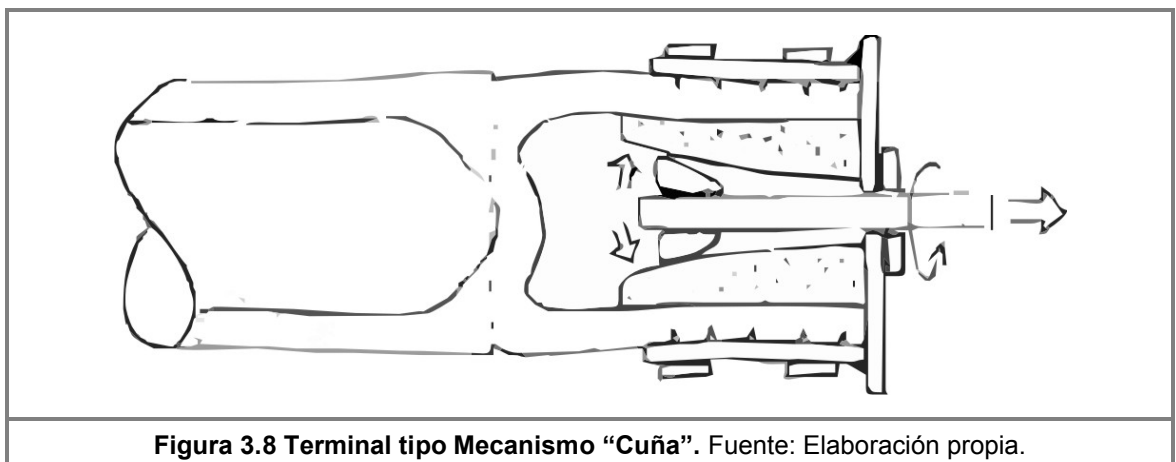


Figura 3.6 Terminal tipo Mecanismo “Tijera”. Fuente: Elaboración propia.

La terminal de la figura 3.7 busca lograr el apriete homogéneo de las caras interior y exterior en un área de contacto grande pero consta de una gran cantidad de partes y muy posiblemente así de grande, será su costo.

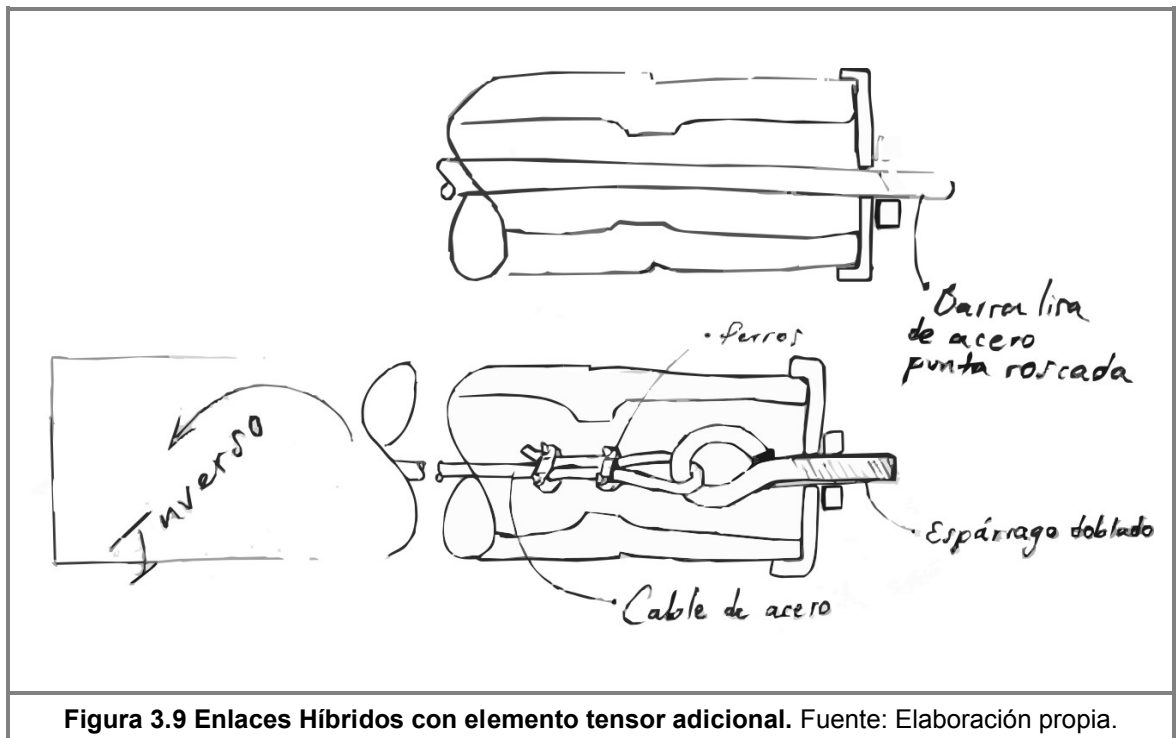


La terminal de la figura 3.8 es una modificación a la de la figura 3.4. Busca homogeneizar un poco la aplicación de la carga sobre las paredes internas y externas de la guadua y que apriete más al halar el espárrago utilizando una especie de cuña.



Las terminales anteriores presentan una desventaja común: constan de gran número de piezas y su fabricación no es fácil. Y adicionalmente, no es fácil predecir su comportamiento ante cargas pues están involucradas gran cantidad de variables.

5. Enlaces híbridos. Además de las anteriores terminales, que buscan aprovechar al máximo las propiedades mecánicas de la guadua sin la ayuda de elementos adicionales principales, se realizaron las siguientes opciones, ver la siguiente figura.



En la figura 3.9 se muestran dos propuestas que utilizan a la guadua como elemento que actúa principalmente solo a compresión. Para recibir las fuerzas de tensión se utilizan otros elementos ubicados en el interior de la guadua. La de arriba lo hace mediante una barra lisa y la de abajo mediante un cable, ambos de acero. También sería posible utilizar un tubo de acero o incluso unas latas de guadua laminadas. Para que sea efectivo, dicho elemento debe tener un buen agarre en los dos extremos de la guadua y una precarga.

Estas propuestas pueden ser una opción con buena viabilidad debido a que su facilidad de fabricación permite una reducción en costos de mano de obra y en los tiempos de prefabricación y ensamble de los enlaces. Presentan como desventaja que no aprovechan la mayor propiedad mecánica que posee la guadua (tensión) y

que significaría una adición de peso alta a los enlaces y en la estructura misma debido a los elementos metálicos presentes a todo lo largo del interior de la guadua.

3.3.2 Evaluación de las alternativas de diseño de enlace. Las alternativas de diseño de Enlace fueron evaluadas con base en las demandas significativas del PDS, ver la siguiente tabla:

Tabla 7. Evaluación de las alternativas de diseño de Enlace

Demanda	Importancia (de 1 a 5)	Tipo de Enlace				
		1	2	3	4	5
Que el prefabricado sea fácil de realizar	5	1	3	3	1	5
Que el prefabricado sea rápido	5	1	3	3	1	3
Que la instalación en obra sea fácil	5	5	5	5	5	5
Que la instalación en obra sea rápida	5	5	5	5	5	5
Que pese poco	5	5	5	5	3	1
Que permita la instalación de cerramientos	3	5	5	5	5	5
Que permita la configuración de estructuras con diferentes geometrías	5	5	5	5	5	5
Que utilice recursos renovables	5	3	3	3	2	1
Que utilice poco material	5	3	5	5	3	1
Que requiera de poca energía para su realización	3	3	5	5	3	1
Que las uniones diseñadas sean estéticas	1	3	3	3	3	5
Que los procesos productivos no sean costosos	3	3	3	3	1	3
Que no cueste mucho	3	3	3	3	2	1
Que sea factible de realizar	5	1	3	3	1	5
Resultado		190	236	236	166	190

Tipos de Enlace evaluados:

- 1: Enlace Contracción Verde
- 2: Enlace Universal Apriete
- 3: Enlace Universal Abrazadera
- 4: Enlace tipo Mecanismo
- 5: Enlace Híbrido

3.3.3 Alternativas de diseño de Nodo.

A continuación se muestran varias alternativas de diseño de nodo.

1. **Nodo tipo esfera MERO.** Una alternativa es utilizar las esferas comerciales del sistema MERO (ver Anexo A), pero su alto costo de consecución o manufactura no las hacen viables todavía.

2. **Nodo articulado tipo Rótula.** La idea era diseñar un nodo que permitiera diferentes ángulos de ensamble entre enlaces. Dependiendo del tipo de estructura diseñado, ésta puede resultar siendo un mecanismo articulado no estable.

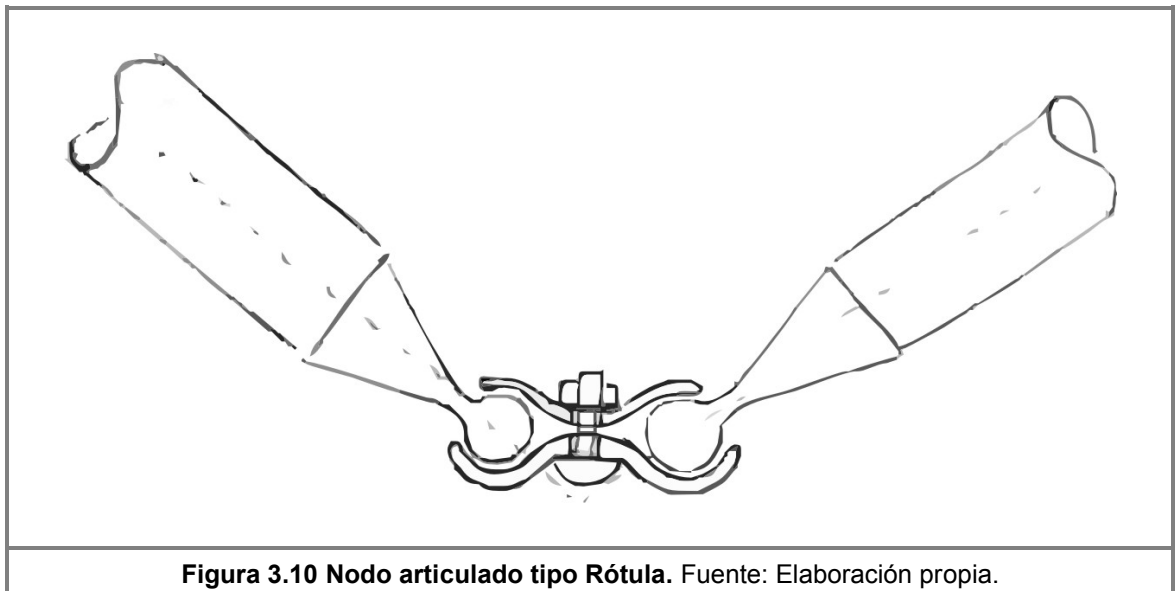
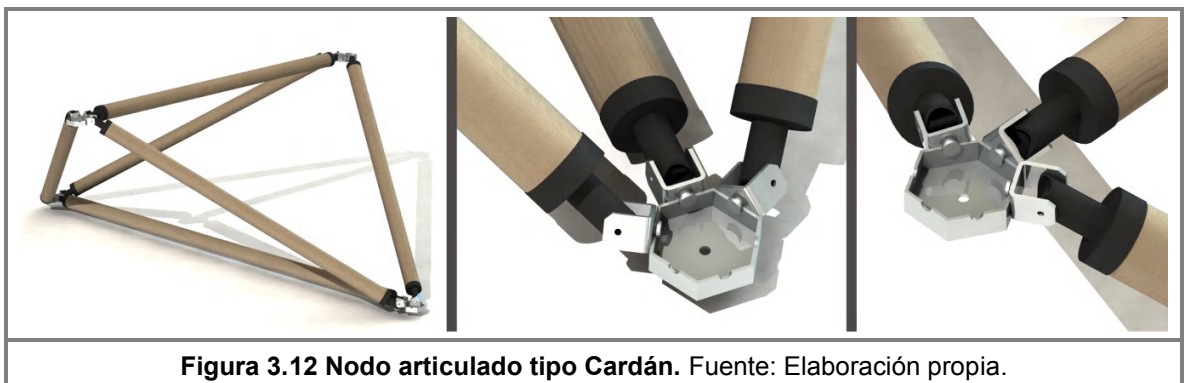


Figura 3.10 Nodo articulado tipo Rótula. Fuente: Elaboración propia.

3. **Nodo tipo Poliedro de Platinas.** La idea es formar, mediante platinas soldadas, poliedros con perforaciones en cada cara donde se ensamblan los enlaces. En la figura 3.11 se muestra un nodo simple de este tipo. Su ventaja se presenta en que son piezas de relativo bajo costo, pero lograr la geometría del poliedro para permitir diferentes ángulos, puede ser complejo. Estructuras que requieran de nodos con diferentes ángulos requeriría de la fabricación de diferentes nodos. El ensamble entre nodo y enlace puede hacerse mediante un espárrago con tuercas o mediante un tornillo.



4. Nodo articulado tipo Cardán. La idea de este nodo era también, como en el caso del nodo tipo rótula, que un solo nodo permitiera diferentes ángulos de ensamble entre enlaces. En la figura 3.12 se puede ver, de manera parcial, este tipo de nodo.



Una desventaja es que consta de un gran número de partes. Al igual que el nodo tipo rótula, dependiendo del tipo de estructura diseñado, ésta puede resultar siendo un mecanismo articulado no rígido.

5. Nodo tipo Pasador en Tubo. Es una modificación a la esfera tipo MERO que reduce la dificultad de ensamble en obra. Para ángulos especiales se deben fabricar nodos especiales.

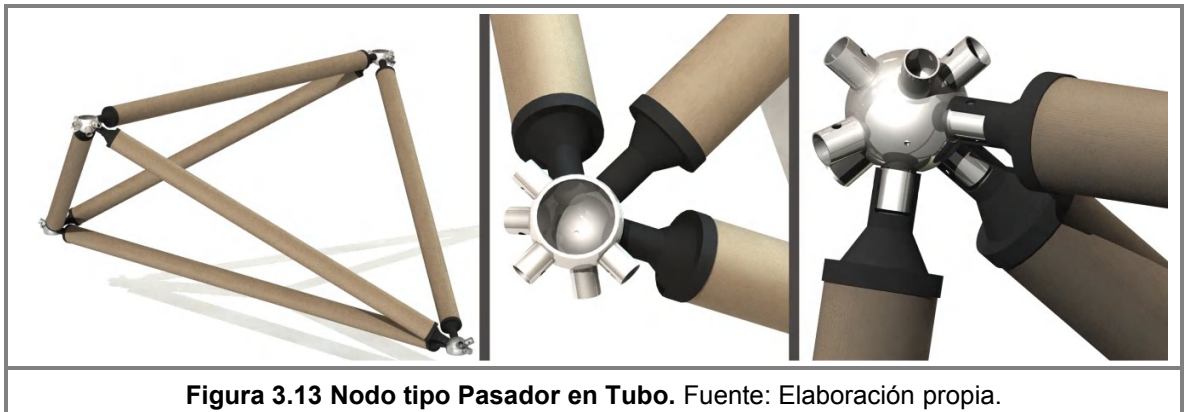


Figura 3.13 Nodo tipo Pasador en Tubo. Fuente: Elaboración propia.

6. Nodo tipo Pasador en Platina. Este tipo de nodo busca que su fabricación sea más simple que las anteriores.

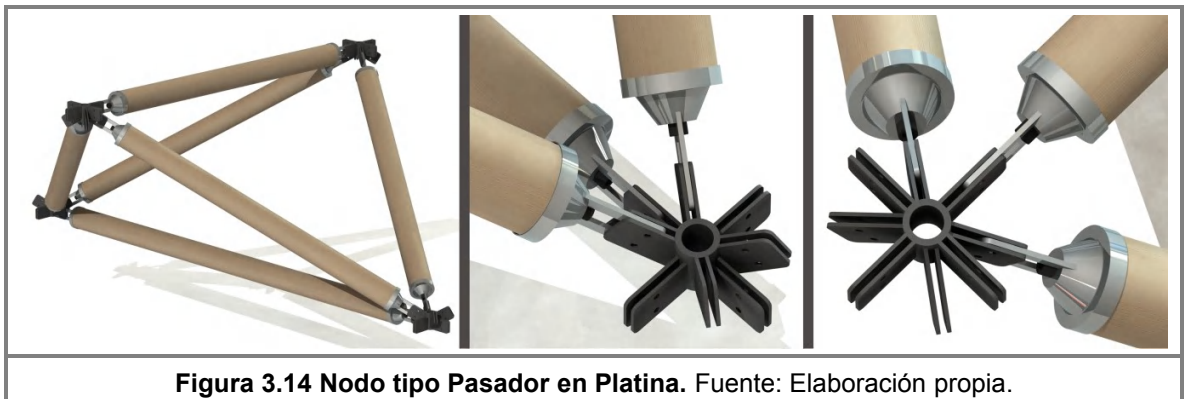


Figura 3.14 Nodo tipo Pasador en Platina. Fuente: Elaboración propia.

Cada tipo de nodo representa ventajas y desventajas según el tipo de estructuras a realizar y no pueden ser calificadas de manera aislada.

3.3.4 Evaluación de las alternativas de diseño de nodo. Las alternativas de diseño de Nodo fueron también evaluadas con base en las demandas significativas del PDS, ver la siguiente tabla:

Tabla 8. Evaluación de las alternativas de diseño de Nodo

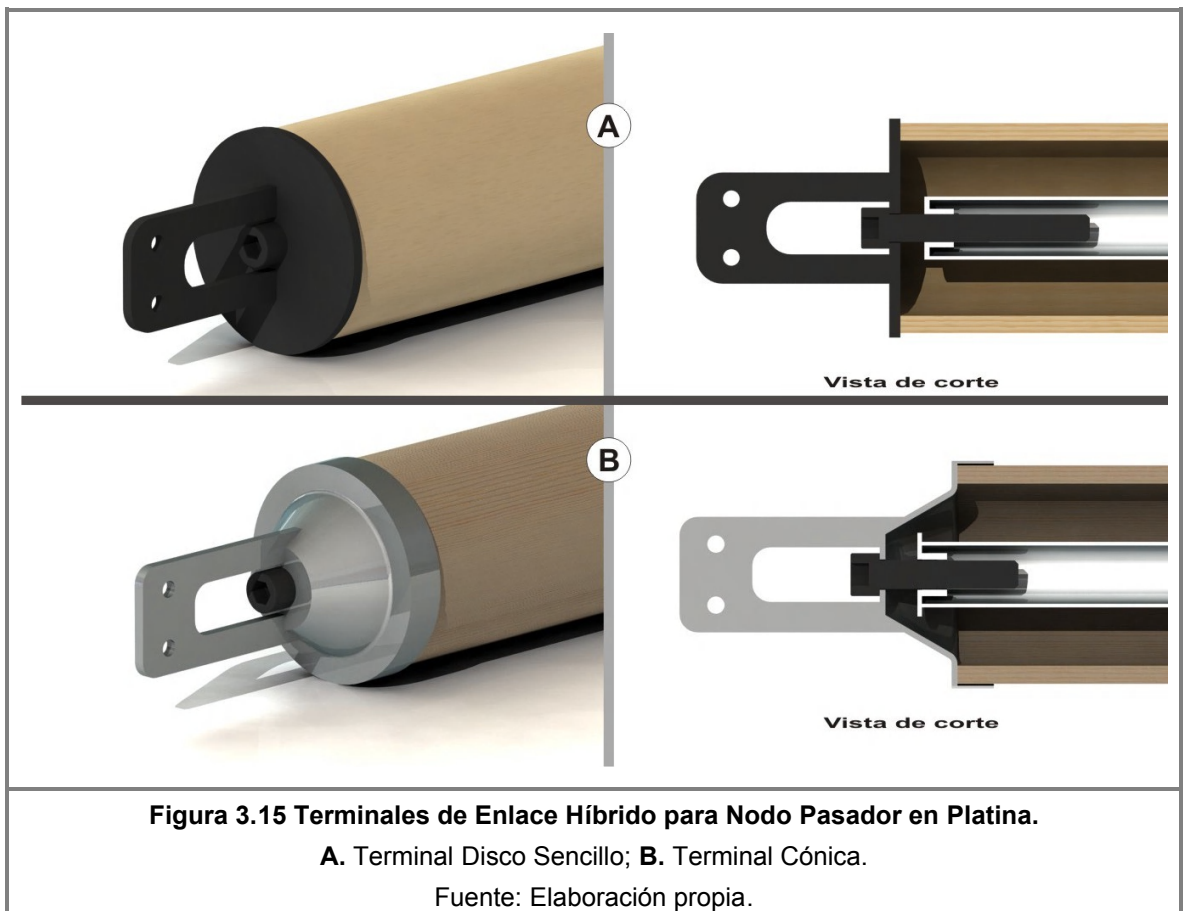
Demanda	Importancia (de 1 a 5)	Tipo de Nodo					
		1	2	3	4	5	6
Que el prefabricado sea fácil de realizar	5	1	1	3	1	1	5
Que el prefabricado sea rápido	5	1	4	3	3	3	3
Que la instalación en obra sea fácil	5	4	3	4	3	5	5
Que la instalación en obra sea rápida	5	3	3	5	3	5	5
Que pese poco	5	2	3	3	1	3	3
Que permita la instalación de cerramientos	3	2	3	3	3	3	3
Que permita la configuración de estructuras con diferentes geometrías	5	5	3	5	5	5	5
Que utilice recursos renovables	5	1	1	1	1	1	1
Que utilice poco material	5	2	2	3	2	2	3
Que requiera de poca energía para su realización	3	1	1	3	1	1	3
Que las uniones diseñadas sean estéticas	1	5	4	4	1	5	3
Que los procesos productivos no sean costosos	3	1	1	5	1	1	5
Que no cueste mucho	3	1	1	5	1	1	5
Que sea factible de realizar	5	1	1	5	3	2	5
Resultado		120	127	212	129	158	226

Tipos de Nodo evaluados:

- 1: Nodo tipo esfera MERO
- 2: Nodo tipo Rótula
- 3: Nodo tipo Poliedro de Platinas
- 4: Nodo tipo Cardán
- 5: Nodo tipo Pasador en Tubo
- 6: Nodo tipo Pasador en Platina

3.4 DISEÑO INICIAL, ANÁLISIS COMPUTACIONAL Y DE LABORATORIO.

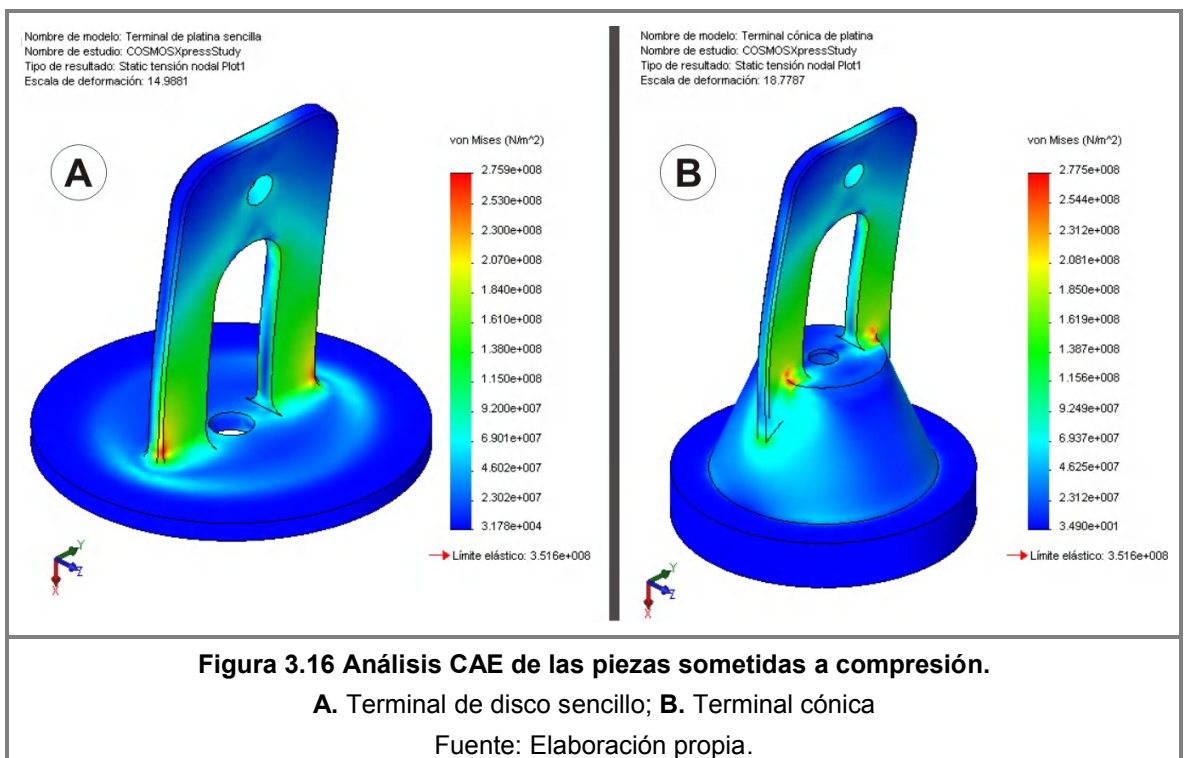
Con base en la evaluación de la tabla 13, de las alternativas de diseño de nodo (capítulo 3.3.3) se eligió la del punto 6 (Nodo tipo Pasador en Platina), figura 3.14. Para poder ensamblar un enlace a este nodo, la terminal debe tener una platina perforada sobre la cual entran uno o varios pasadores. Luego esta platina debe transferir la fuerza desde el pasador hacia la guadua; se diseñaron dos maneras de hacerlo, ver figura 3.15; la terminal de la imagen A transfiere la fuerza de la platina a la guadua mediante un disco metálico y la terminal de la imagen B lo hace mediante un cono metálico.



Utilizando guadasas de un largo entre 2 y 3 metros se obtiene una carga de compresión admisible entre 2.69 y 5.27 toneladas considerando el pandeo (ver anexo E), se desea entonces que las terminales brinden una resistencia similar a dichos valores.

3.4.1 Análisis de elementos finitos inicial. Se realizó un análisis inicial de elementos finitos mediante el software CAE (Computer-aided Engineering) CosmosWorks y CosmosXpress.

Del análisis de las piezas A y B de la figura 3.15 se observó que era más crítica la fuerza de compresión que la de tensión y que la resistencia de compresión estaba relacionada principalmente con la esbeltez de la platina; en la figura 3.16 se pueden ver las piezas deformadas y sus tensiones internas. En el Anexo C se incluye el informe completo del análisis CAE de las piezas.



Se concluyó entonces que la terminal cónica no representaba una ventaja pues resistía igual a la de disco sencillo pero su manufactura era más difícil. Si la platina no resistía lo deseado a ésta se le debía reducir su esbeltez de alguna manera. A continuación en las pruebas iniciales se muestra una terminal de platina reforzada.

3.4.2 Pruebas de laboratorio iniciales. Se realizaron unas pruebas de laboratorio iniciales para analizar el comportamiento de diferentes variaciones de terminales. Se realizó una prueba de compresión sobre la terminal de disco con platina sencilla, otra sobre la terminal de disco con platina reforzada con pie amigos y una sobre una terminal que intenta poner a trabajar la guadua a tensión.

Hay que considerar que la máquina universal de ensayos del Laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT (Schenck Trebel UPM120) con la cual se contó para la realización de estas pruebas, posee un desplazamiento máximo de 25 centímetros y una fuerza máxima de 120kN, parámetros que limitaban el alcance de las pruebas.

- **Prueba 1.** La prueba de compresión en la terminal de disco con platina sencilla llegó al fallo en una carga de 59.1kN, ver figura 3.18. Inicialmente comenzó a deformarse la zona de la perforación donde se ubica el pasador, ver figura 3.19. El pasador sufrió una flexión y no un corte. La platina falló por pandeo y el disco no tuvo una flexión significativa. Los resultados se plasman más adelante en el gráfico 2.

A continuación se muestran los resultados de la prueba de compresión en la terminal de disco con platina sencilla. Los planos de la probeta se incluyen en el Anexo D.

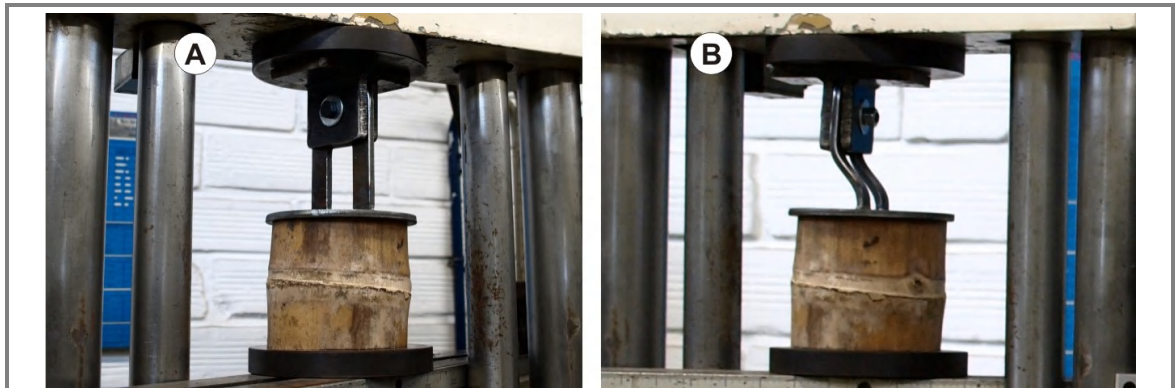


Figura 3.17 Prueba de compresión en la terminal de disco con platina sencilla.

A. Estado inicial; B. Resultado deformado

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.18 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal de disco con platina sencilla.

Fuente: Elaboración propia.

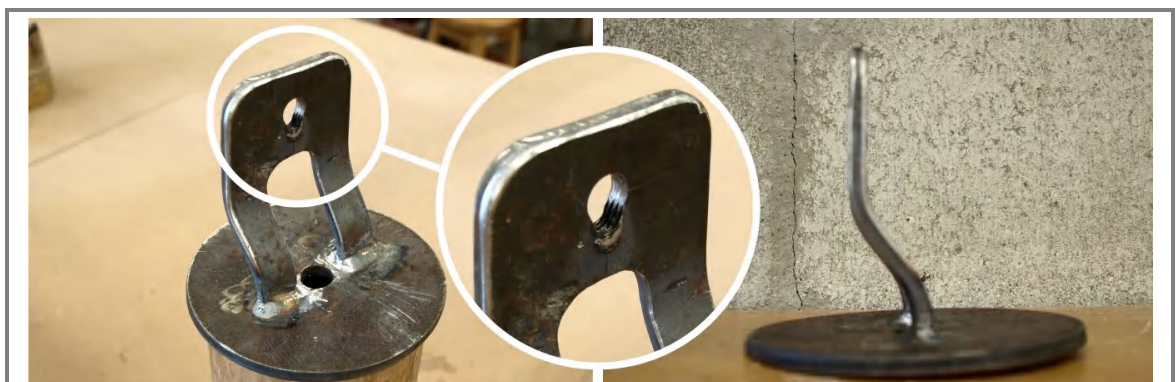
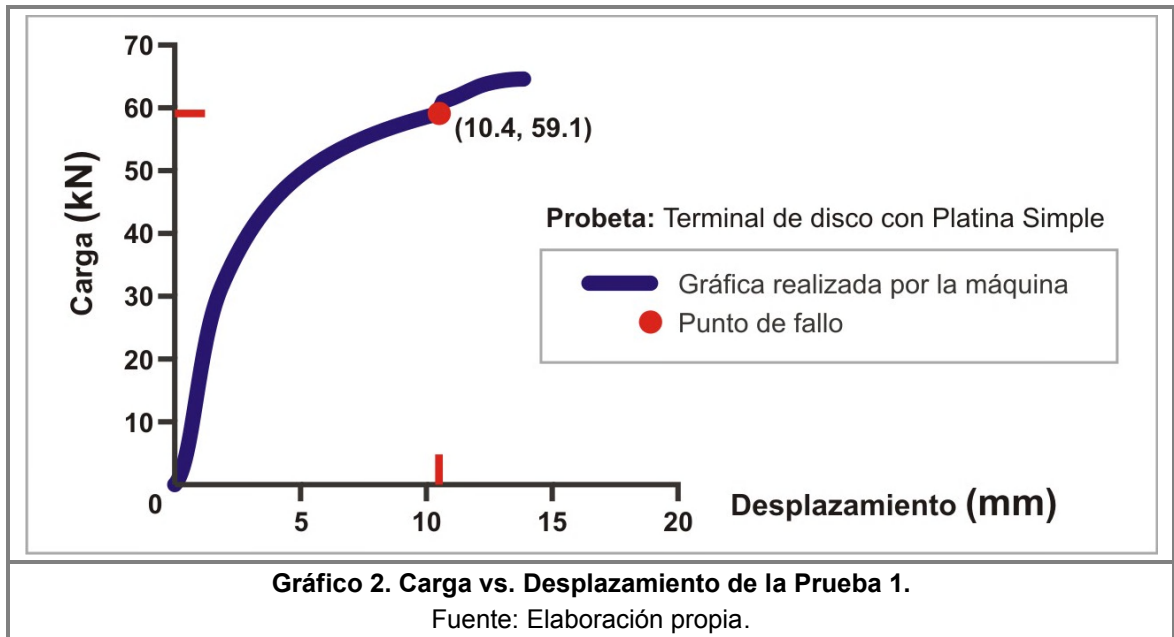
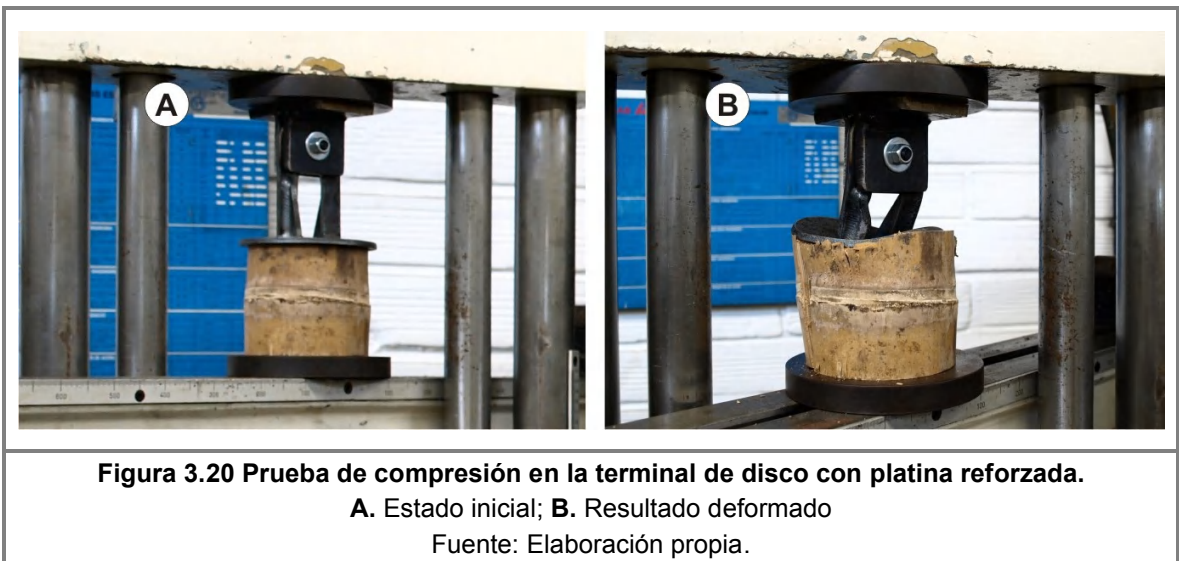


Figura 3.19 Terminal de disco con platina sencilla deformada como resultado de la prueba de compresión.

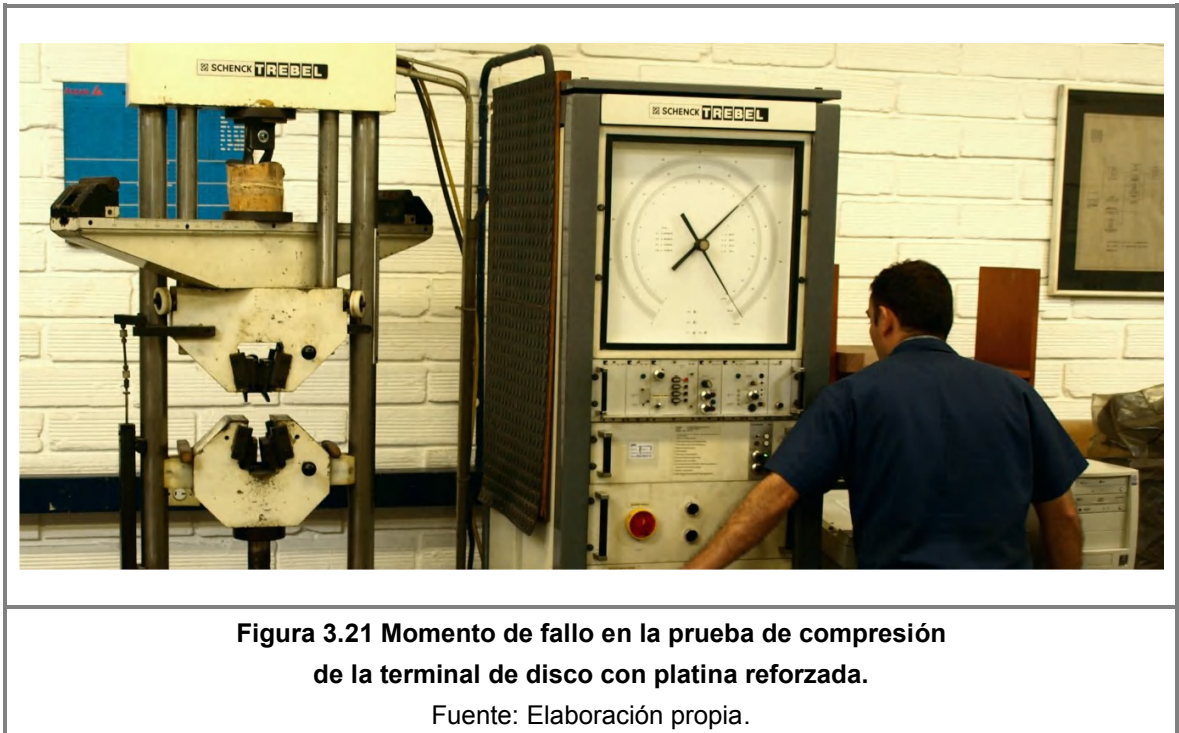
Fuente: Elaboración propia.



- **Prueba 2.** La prueba de compresión en la probeta de platina reforzada con pie amigos llegó al fallo en una carga de 118.4kN, ver figura 3.21. Los planos de la probeta se incluyen en el Anexo D.



Los resultados son plasmados en el gráfico 3. Al comienzo de la gráfica ocurre un desplazamiento brusco debido a que el pasador no estaba ajustado contra la superficie inferior de la perforación de la platina, por lo tanto dicho desplazamiento no se considera una deformación.



Al igual que en la prueba anterior, primero va ocurriendo una deformación gradual en la zona de la perforación donde se ubica el pasador y el pasador se flexa; dicho desplazamiento provocó que el soporte que transfiere la carga al pasador se apoyara en los pie amigos y luego ocurrieran, casi simultáneamente, la deformación de la platina y la flexión del disco. Cuando el disco inicia la deformación, va tomando una forma cóncava y comienza a introducirse en el interior de la guadua cambiando la dirección de las fuerzas axiales a perpendiculares provocando el fallo de la guadua. Es importante notar que la carga de compresión aplicada no era suficiente para hacer fallar la guadua por compresión axial, aún así, ésta falla porque la deformación del elemento metálico induce unos esfuerzos no axiales, sobre los cuales la guadua no posee buena resistencia.



Figura 3.22 Terminal de disco con platina reforzada deformada como resultado de la prueba de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

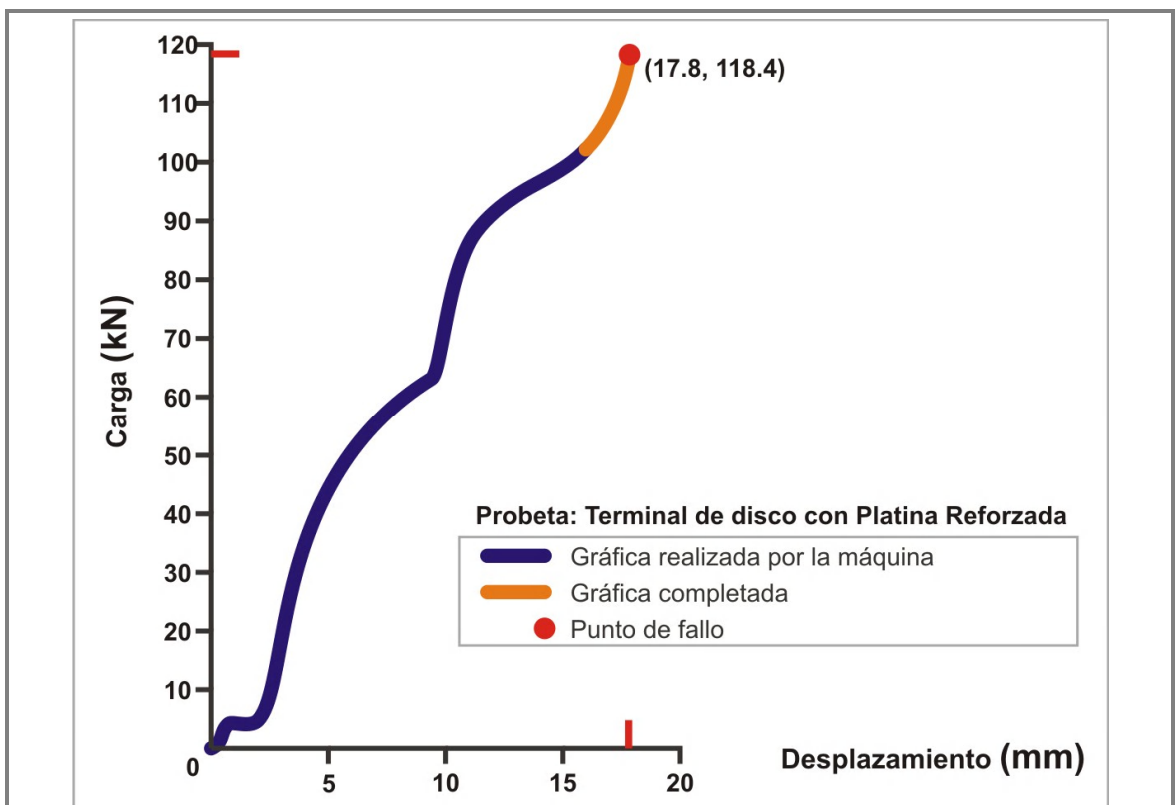


Gráfico 3. Carga vs. Desplazamiento de la prueba 2.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: la gráfica original no se pudo realizar completamente debido a que no se ajustó la escala para que cupiera en la hoja.

- **Prueba 3.** A continuación se muestra la prueba realizada sobre la terminal que intenta aprovechar al máximo la resistencia de la guadua.

Se planteó un diseño de terminal tipo Universal Abrazadera como el de figura 3.4 y se sometió a prueba. Consta de unas platinas con superficie interna rugosa que intentan agarrar la pared de la guadua con la ayuda de una abrazadera y el interior del último canuto de la guadua posee un relleno que impide que la guadua se aplaste al apretar (ver figura 3.23). Al someterse a tensión, la terminal tendría una resistencia proporcional al agarre que tuvieran estas platinas con la guadua. Se realizó entonces una prueba para ver el comportamiento de dicho agarre.



Figura 3.23 Terminal tipo Universal Abrazadera para ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.24 se muestra el momento de fallo en dicha terminal. Los planos y otras especificaciones adicionales de la probeta se incluyen en el Anexo D.



Figura 3.24 Momento de fallo en la prueba de compresión de la terminal tipo Universal Abrazadera.

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de compresión en la probeta tipo Universal Abrazadera llegó al fallo en una carga de 20kN, su respectiva curva de Carga vs. Desplazamiento se muestra en el gráfico 4.

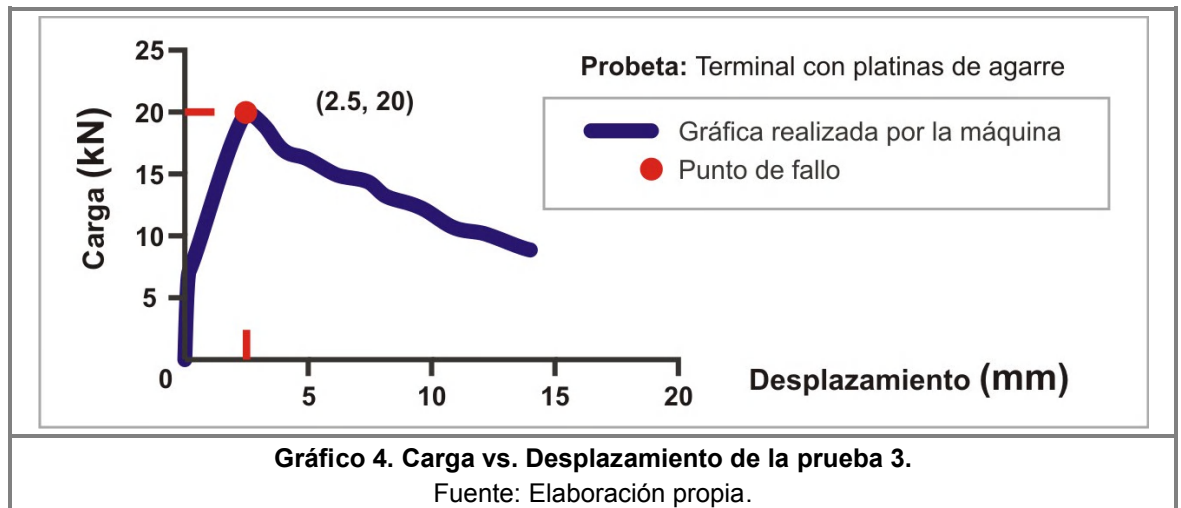


Gráfico 4. Carga vs. Desplazamiento de la prueba 3.

Fuente: Elaboración propia.

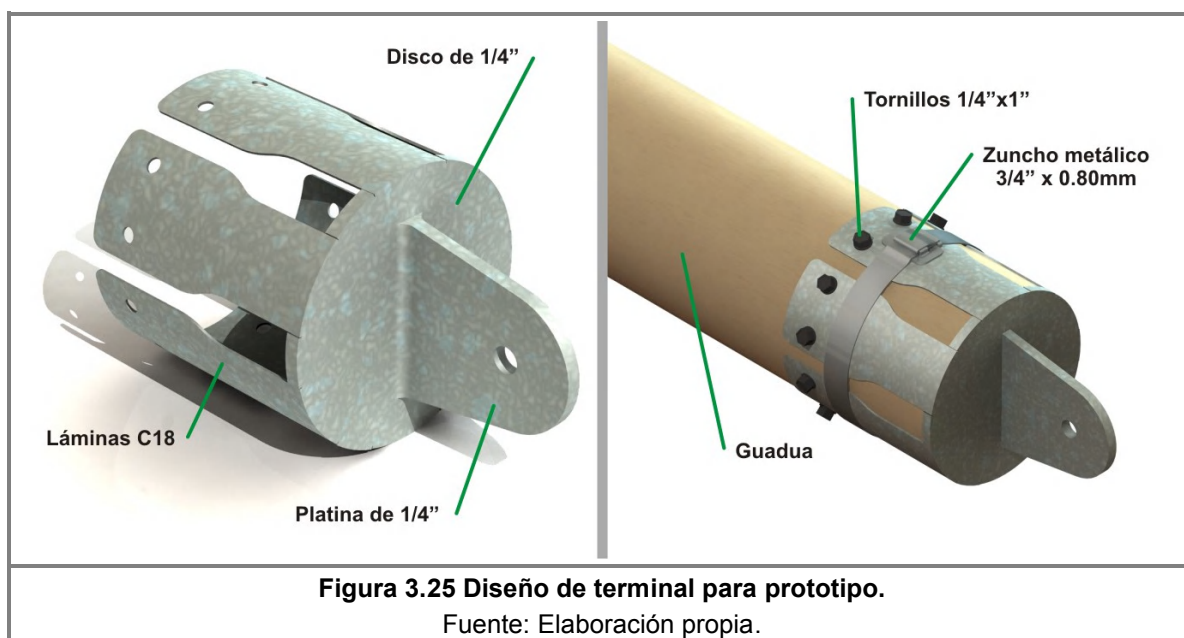
Durante la prueba, ninguno de los componentes de la probeta sufrió deformaciones; solo ocurrieron unos pequeños rasguños en la superficie exterior de la guadua donde deslizaron las platinas.

3.4.3 Recomendaciones a partir de las pruebas para el rediseño de la terminal:

- Utilizar la guadaña en elementos que solo estén sometidos a compresión hasta que se desarrolle una terminal que funcione a tensión también.
- Aumentar la especificación del pasador (diámetro y/o tipo de material).
- Aumentar la distancia a los bordes de la perforación donde entra el pasador.
- Utilizar un pasador que no tenga rosca sobre la superficie de apoyo en la perforación de la platina.
- Reducir la longitud de la platina (reducir esbeltez).
- Aumentar la especificación de la platina (espesor y/o tipo de material).
- Aumentar el ancho de la platina en el lado que apoya sobre el disco.
- Si es posible continuar utilizando los pie amigos.
- En lo posible, reducir los juegos entre ensambles.
- En el momento de ensamble de una estructura o en una prueba, realizar una precarga y luego apretar los tornillos.

3.5 DISEÑO DE DETALLE

3.5.1 Diseño definitivo. Considerando las recomendaciones anteriores, inicialmente se diseñó una terminal pensando que solo funcionara a compresión; pero se le hizo una pequeña variación pensando en que sería posible ponerla a trabajar a tensión. Se tomó como referente una de las dos propuestas de la tesis de Sandra Clavijo y David Trujillo (Evaluación de Uniones a Tracción en Guadua).



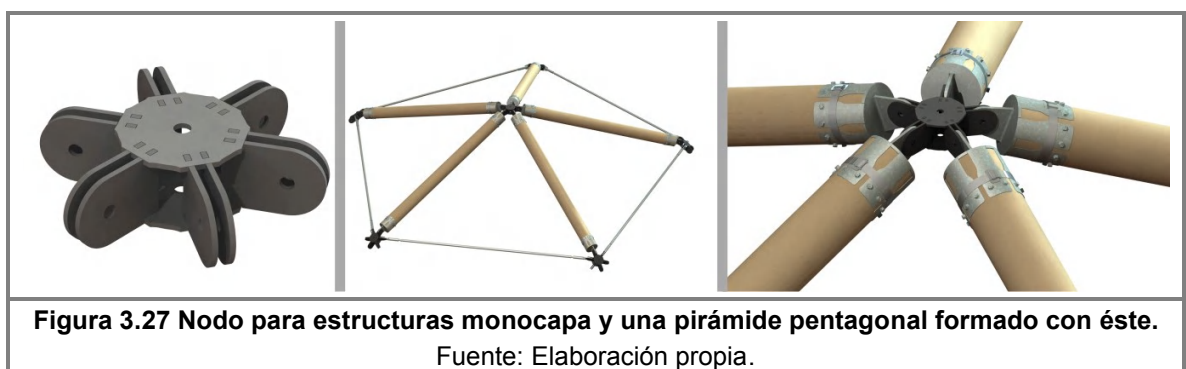
Nota: los planos de la terminal se incluyen en el Anexos D.

La unión propuesta por ellos (ver imagen B de la figura 2.2.31) intenta reducir la cortante producida por un pasador en la guadua al utilizar doce tornillos. La adición de los doce tornillos significa un gran aumento en el número de partes y procedimientos de ensamble pero se justifica en la medida en que signifique una reducción de elementos adicionales trabajando a tensión en una estructura. Aunque la terminal diseñada (figura 3.25) no cuenta con las mismas

especificaciones de la propuesta de los autores en la tesis mencionada, se piensa que posiblemente tenga un comportamiento similar.

Debido a que las guaduas presentan una gran variación de diámetros, espesores y forma (a veces la sección circular tiende a ser ovalada), la terminal debe contar con cierta adaptación y tolerancia a esta condición y por ello se llegó a la solución de la figura 3.25 en las cuales las terminales cuentan con unas láminas curvas calibre 18 que mediante el apriete del zuncho se ajustan al contorno de la guadua.

En cuanto a los nodos, a partir de la evaluación de la tabla 8, se eligió el nodo tipo pasador en platina. Se diseñaron variantes de este tipo de nodo para configurar diferentes tipos de estructura. En la figura 3.26 y 3.27 se presentan dos de los nodos diseñados.

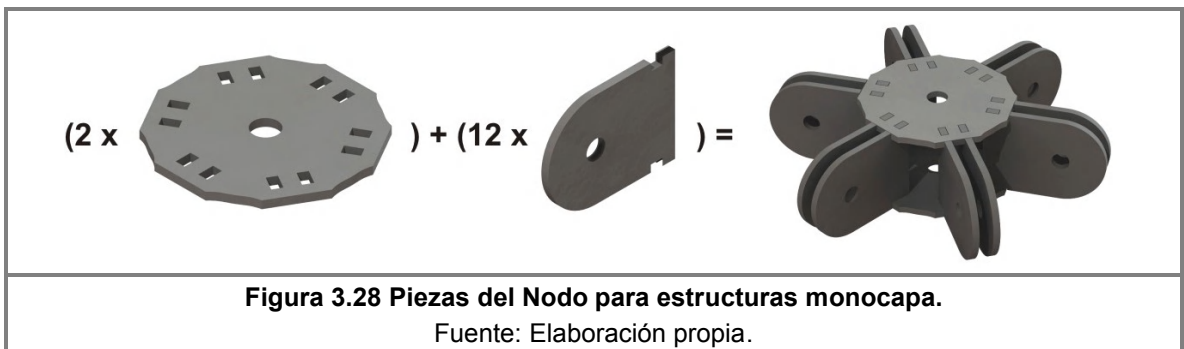


Nota: Aunque no se necesitan planos para su fabricación, se incluyen igualmente en el Anexo D.

Más adelante se muestran ejemplos de algunas de las posibles estructuras que se pueden construir a partir de los nodos y enlaces diseñados.

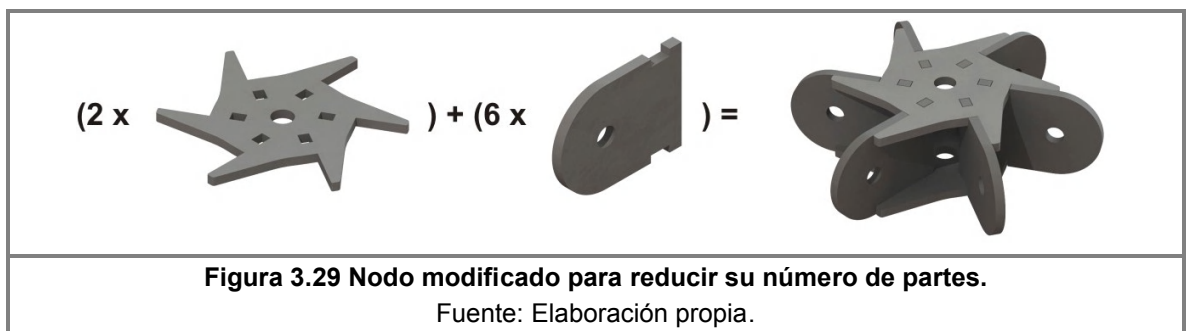
3.5.2 Diseño para X. El diseño para X se refiere a diseñar considerando la variable X, que para nuestro caso específico tomaremos como Manufactura y Ensamble. El diseño para la manufactura y el ensamble (DFMA por sus siglas en inglés Design for Manufacturing and Assembly) son herramientas básicas de ingeniería para reducir la complejidad de los productos. Influye sobre criterios como la selección de materiales, dimensión y calibre de los mismos, selección de procesos, forma y tamaño de piezas, uso de partes estándar, formas de ensamble y cantidad de partes. Controlando dichas variables se logra aumentar la calidad del producto, reducir tiempos de manufactura y ensamble y disminuir el costo.

Para la Manufactura de las terminales y los nodos, era crítico que la ubicación de las piezas a soldar tuviera la posición y el ángulo correcto. Tradicionalmente para hacer esto se utilizan plantillas prefabricadas sobre las cuales se ubican las piezas a soldar. No conformes con dicha forma de lograrlo se diseñaron piezas en la cual sus formas obedecieran a las condiciones de ensamble, es decir, que gracias a sus formas se permitiera el ensamble para soldar sin la ayuda de plantillas; en la figura a continuación se ilustra lo dicho.

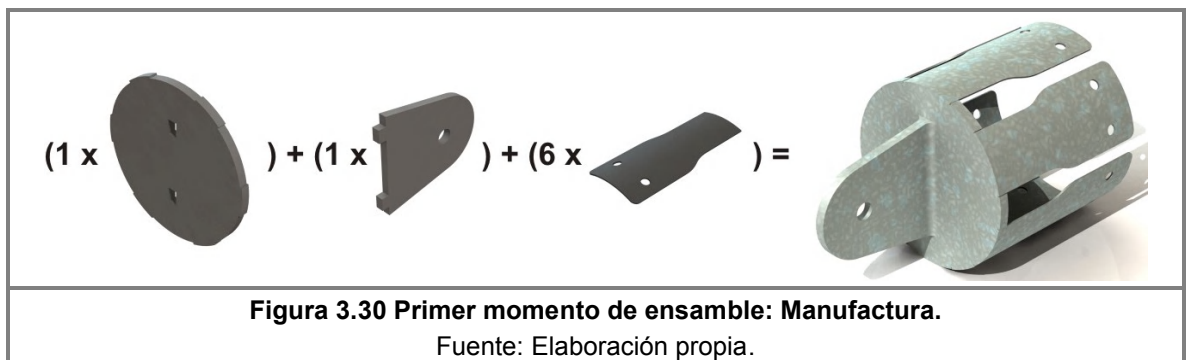


Al nodo de la figura 3.28 puede reducirse su número de partes de la manera como muestra la figura 3.29, pero habría que evaluar si se afecta el desempeño de la pieza pues la fuerza cortante en los pasadores se estaría aumentando.

Para lograr que las piezas permitieran dichos ensambles, estas debían ser obtenidas a partir procesos que contaran con la precisión necesaria. Se plantea que en el momento de requerirse una producción en serie se fabriquen las piezas a partir de corte por láser CNC pues, aunque es un proceso costoso, es el único que tiene una tolerancia dimensional aceptable para permitir el ensamble mencionado anteriormente con los calibres utilizados en el diseño.



En el sistema diseñado podemos decir que ocurren tres momentos de ensamble. El primer ensamble ocurre cuando las piezas metálicas se unen para ser soldadas (figuras 3.28, 3.29 y 3.30). El segundo ensamble ocurre luego de que dichas piezas son soldadas y conforman otro elemento con la guadua (figura 3.31). El tercer ensamble es la construcción o instalación de la estructura (figura 3.32).





Además del usuario final de una estructura, cada momento de ensamble tiene un usuario específico (soldador, ensamblador, e instalador respectivamente) que fue considerado desde el diseño mismo.

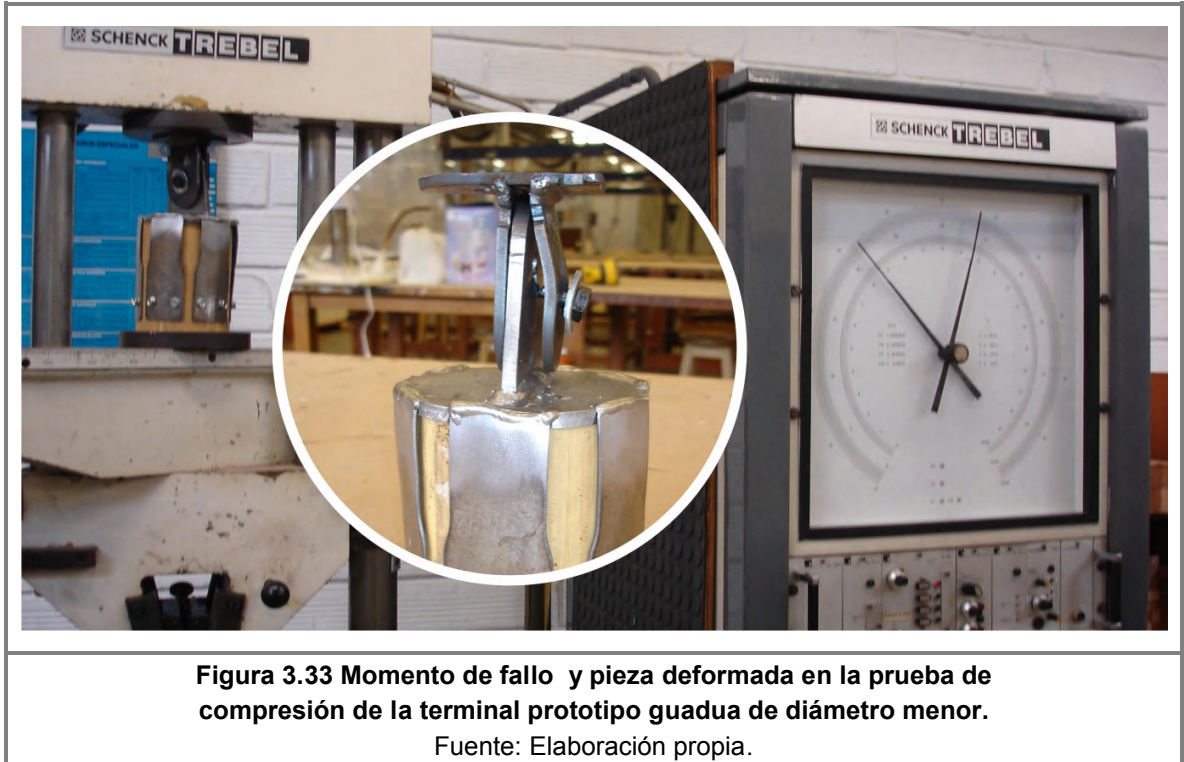
El sistema resultante del proceso de DFM y DFA disminuye tiempos de fabricación y aumenta la calidad al reducir la posibilidad de error humano.

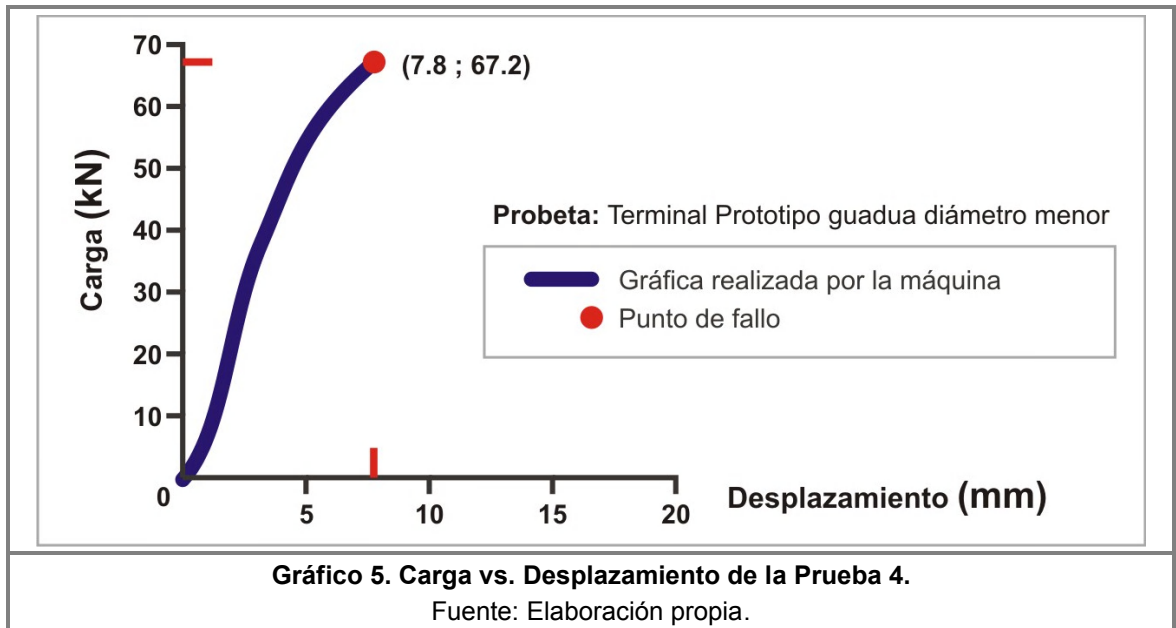
Gracias al diseño resultante de terminales y nodos no se requiere de planos para la fabricación pues con los archivos generados a partir del software CAD (Computer-aided Design) con extensión .dxf se realiza el corte por láser mediante la ayuda de un software CAM (Computer-aided Manufacturing) y luego con unas breves explicaciones al soldador y ensamblador o un manual de taller son finalizadas las piezas necesarias.

3.5.3. Pruebas sobre los elementos del prototipo. Para tener una idea sobre como era el comportamiento mecánico de las piezas rediseñadas para utilizar en el prototipo, se realizaron las siguientes pruebas de compresión. Dos sobre las terminales y una sobre una pieza que representa a un nodo del sistema diseñado.

- **Prueba 4.** La prueba de compresión sobre la terminal prototipo con guadua de diámetro menor (106mm), llegó al fallo en una carga de 67.2kN.

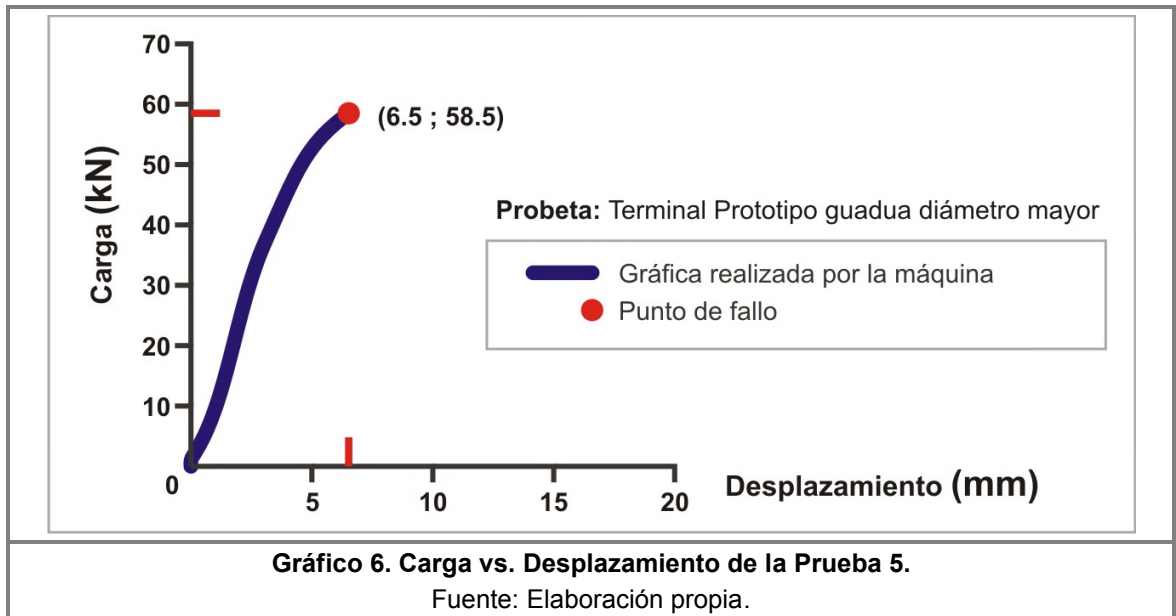
Ni la guadua, ni las platinas curvas, ni el disco tuvieron deformaciones visibles. La platina de la terminal no sufrió pandeo. La zona de la perforación donde se ubica el pasador sufre deformaciones y dicho pasador (tornillo diámetro 3/8" grado 5) falla por corte. Una de las platinas (espesor 3/16") que transfieren la fuerza al pasador sufre una deformación considerable. En la figura y gráfico a continuación se expone el comportamiento de la probeta.





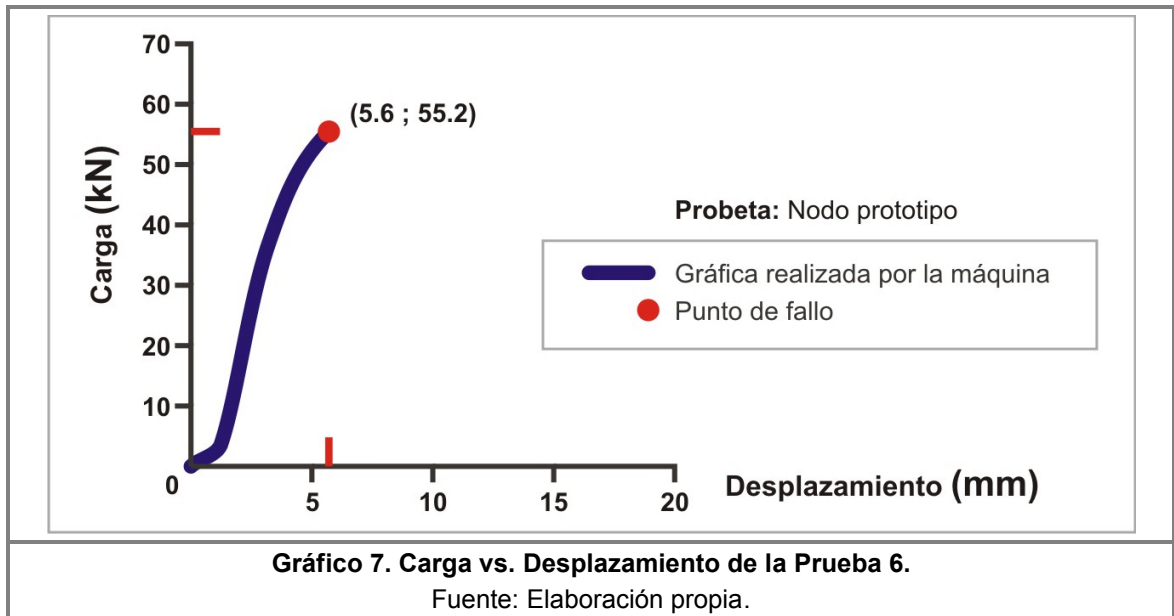
- **Prueba 5.** La prueba de compresión sobre la terminal prototipo con guadua de diámetro mayor (119mm), llegó al fallo en una carga de 58.5kN. Esta probeta, aunque tuvo una resistencia menor a la anterior, tiene exactamente el mismo comportamiento. En la figura y gráfico a continuación se expone su comportamiento.





- **Prueba 6.** La prueba de compresión sobre el nodo, llegó al fallo en una carga de 55.2kN. Esta probeta tiene el mismo comportamiento que las dos probetas anteriores. Se deforma la zona del pasador, el pasador falla por corte y una de las platinas de 3/16" se deforma. En la figura y gráfico a continuación se expone.

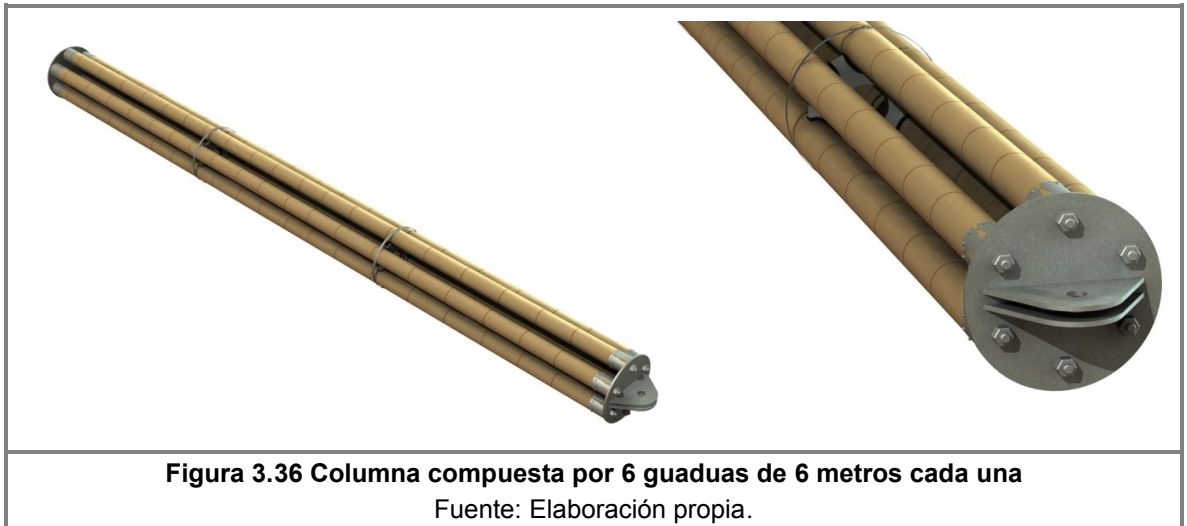




Sería necesario además realizar pruebas de tensión axial sobre elementos del sistema, pero las máquinas de ensayo universal que posee la universidad no cuentan con la distancia requerida por la probeta para dicho fin, que en este caso sería mínimo de un metro de largo. Aún así se piensa que la probeta a tensión tendría una resistencia similar a la de compresión pues está fallando la zona del pasador y no están ocurriendo fenómenos propios de fuerzas a compresión como el pandeo.

Un enlace (guadua con dos terminales) posee puntos pivotantes en sus dos extremos que idealmente transmiten las fuerzas de manera axial sobre la guadua. En la práctica, según el diseño de estructura, pueden ocurrir fuerzas no axiales sobre los enlaces que se traducen en esfuerzos de flexión, se piensa dicho elemento tendría una resistencia a la flexión ligeramente menor que las de compresión y tensión.

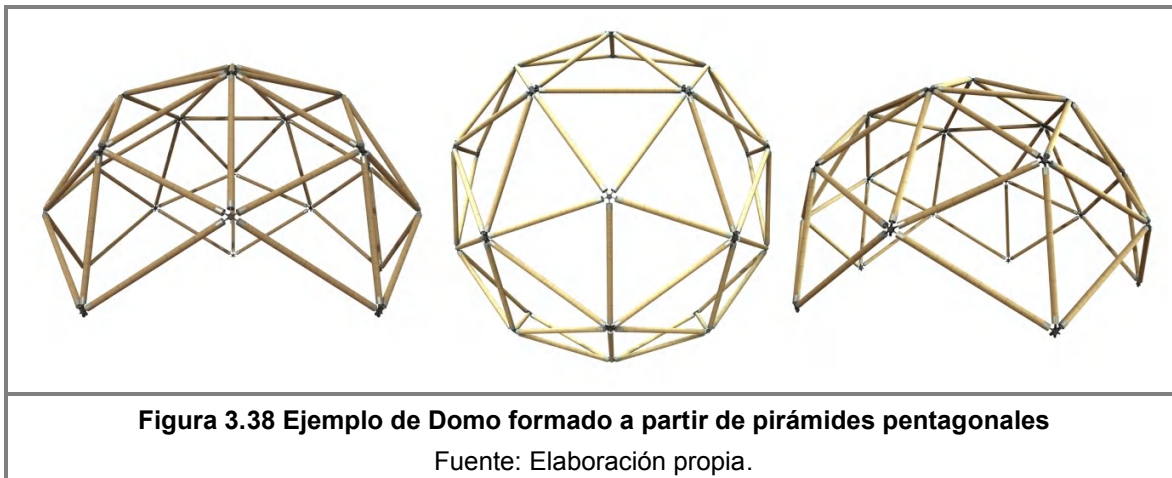
3.5.4 Elementos constructivos especiales. Es posible edificar estructuras con mayores especificaciones en cuanto a resistencia y luces considerables mediante la utilización de columnas y vigas compuestas por varias guaduas. Ver figura a continuación.



Una columna como la de la figura 3.36 podría tener una resistencia entre 26.69 y 32.86 toneladas a compresión dependiendo de la sección transversal de las guaduas utilizadas. En el anexo E se exponen los cálculos.

3.5.5 Diseño de estructuras. A continuación se muestran algunos ejemplos de estructuras que se pueden lograr mediante el sistema diseñado.





Se pueden efectuar un sin número de estructuras realizando unas pequeñas modificaciones sobre los ángulos de los nodos y la longitud de los enlaces.

Mediante dicho sistema es posible edificar estructuras como cubiertas de grandes luces que tendrían aplicación para centros comerciales, bodegas, pabellones, talleres, industrias, galpones, zonas sociales de residencias y hoteles, viviendas de varios pisos e incluso podría ser utilizado para estantería de carga pesada o estructuras temporales para eventos como conciertos y ferias.

A las estructuras diseñadas se les debe realizar un análisis estático juicioso para establecer donde ubicar los diferentes tipos de elementos y los esfuerzos admisibles en cada uno.

3.5.6 Diseño de sistemas complementarios. El interior de una estructura debe brindar protección y comodidad de las personas que la ocupan. Debe poseer unas condiciones apropiadas de temperatura, protección al viento y al agua. Dichas condiciones las brinda un cerramiento apropiado.

Se diseñaron unos dispositivos que se adaptan a los nodos de la estructura para permitir el anclaje de paneles que pueden ser de vidrio, plásticos, aglomerados,

cerámicos, metales o compuestos y así conformar el cerramiento de una edificación. El sistema puede ser utilizado como cerramiento lateral (fachadas y muros) o como cubierta (techos) y se diseñó una variación especial para losas (pisos). En las figuras a continuación se presentan.

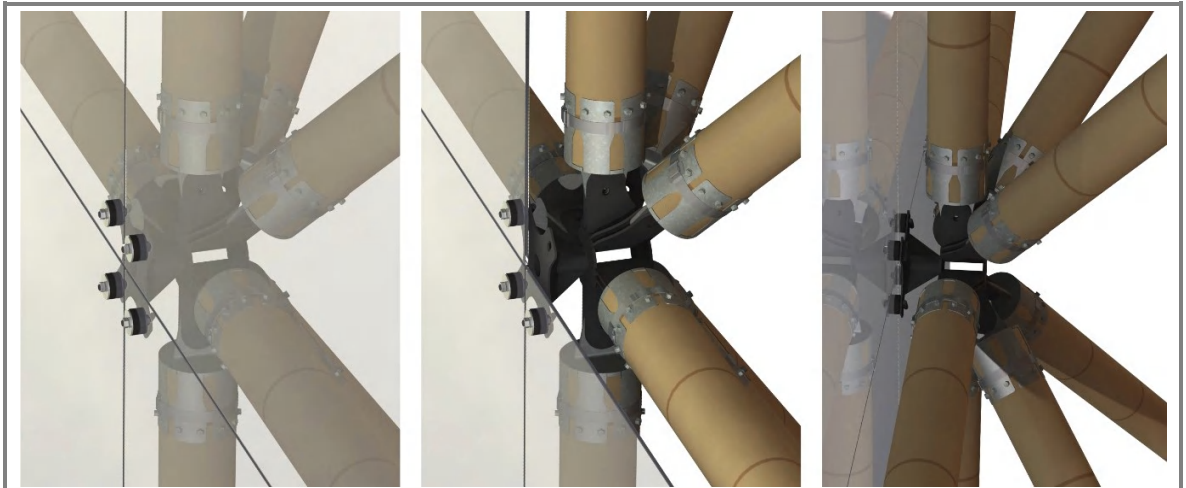


Figura 3.39 Sistema de cerramiento en vidrio tipo araña para fachada

Fuente: Elaboración propia.

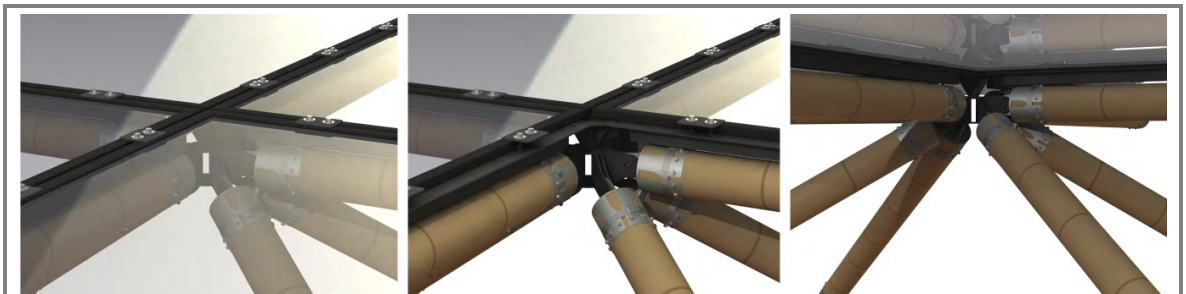


Figura 3.40 Sistema de cerramiento en vidrio tipo tornillo para fachada o cubierta

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.41 Sistema de cerramiento en vidrio tipo snap-fit para fachada o cubierta

Fuente: Elaboración propia.

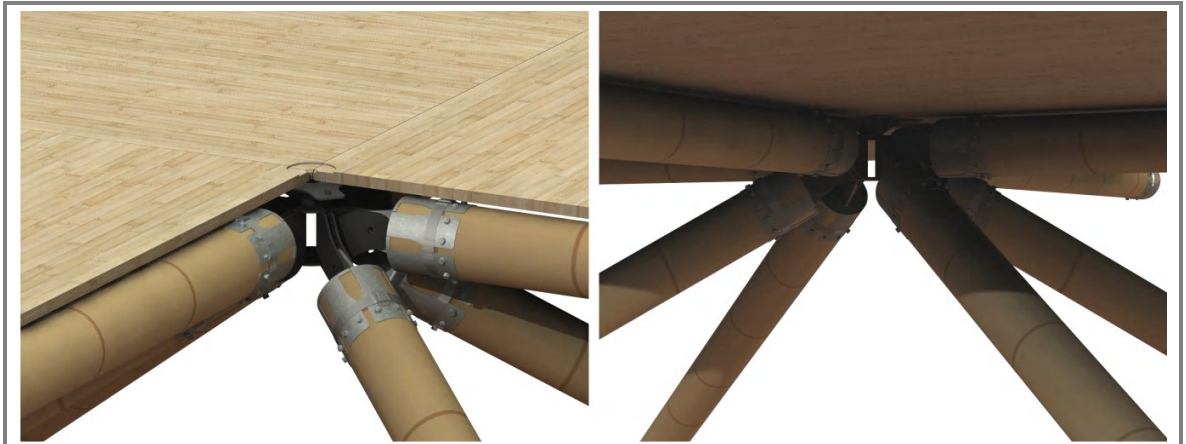


Figura 3.42 Sistema para losa

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas de cerramiento se diseñaron pensando en la posibilidad de desinstalación, hecho que permite abrir el mercado hacia las construcciones temporales y stands en ferias. Sistemas de cerramiento comúnmente utilizados en nuestro medio, como el de mampostería y bahareque encementado, pueden ser utilizados considerando que la construcción resultante no sería tan fácil de reparar y desarmar.

4. MATERIALIZACIÓN DEL PROTOTIPO

A continuación se presenta una síntesis de lo que fue el proceso de fabricación del prototipo.

Lo primero que se fabricó fueron las piezas metálicas. El primer paso para obtenerlas consistió en cortar láminas metálicas calibres 18, 3/16" y 1/4". Por razones de tiempo, costo y accesibilidad éstas se cortaron en la cortadora de plasma CNC de la universidad EAFIT. La máquina es de la marca Shop Sabre referencia 4896 que utiliza un software CAM llamado Ramsgold. La máquina cuenta con unas tolerancias dimensionales no apropiadas para lo que plantea el diseño en el capítulo anterior y por ello, luego de este paso, las piezas tuvieron que ser rectificadas por procesos de fresado y pulido y esmerilado manual.



Figura 4.1 Mesa de corte por plasma CNC

Fuente: Elaboración propia.

Las láminas metálicas fueron soldadas mediante soldadura MIG (Metal Inert Gas) y TIG (Tugsten Inert Gas) para conformar los nodos y terminales requeridas para el prototipo. Luego, dichas piezas metálicas fueron galvanizadas.

Los trozos de guadua fueron cortados mediante una acolilladora marca DELTA con un disco de 12". Las guaduas fueron recubiertas con Impranol color Limba a brocha; el fabricante dice que aplicando tres manos del producto se brinda una protección efectiva a la intemperie (sol y agua directos).

El ensamble de las terminales con las guaduas se realizó mediante tornillos autoperforantes calibre 12 de una pulgada de largo utilizando un taladro manual de velocidad variable. La guadua no debe ser perforada previamente.



Figura 4.2 Enlaces y nodos fabricados

Fuente: Elaboración propia.

El ensamble de la estructura se realizó mediante tornillos 3/8" x 1 1/2" y no hubo inconvenientes en el encaje de las piezas pues se había considerado un juego necesario para ello. Al ensamblar si los tornillos no se encuentran bien apretados la estructura queda con cierto grado de libertad y presenta cierto movimiento,

luego de apretar los tornillos la estructura queda firme. En la figura a continuación se muestran varias estructuras armadas como prototipo.



Figura 4.3 Prototipo: Estructura en forma de tetraedro irregular

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.4 Prototipo: Estructura en forma de pirámide pentagonal

Fuente: Elaboración propia.

5. ANÁLISIS DEL NUEVO SISTEMA

En el presente capítulo se hará una comparación de los resultados obtenidos en el prototipo en comparación con los requerimientos plasmados en el PDS y serán consideradas tanto las variables cuantificables como las cualificables.

5.1 ANÁLISIS DE VARIABLES CUANTIFICABLES

5.1.1 Resistencia. Los requerimientos del PDS en cuanto a resistencia son dos, que un enlace de dos metros de largo debía resistir por lo menos 2 toneladas a compresión y a tensión y que debían diseñarse diferentes elementos estructurales (como columnas y vigas) para diferentes magnitudes de carga.

Un enlace completo con una guadua de dos metros más sus dos terminales no pudo ser ensayada pues no se contó con una máquina de ensayos universal que permitiera dicho largo de probeta, entonces cada elemento debió ser analizado por separado. La guadua fue analizada mediante cálculos teóricos (ver Anexo E) y se concluyó que una guadua de dos metros de largo puede tener una resistencia de compresión admisible (con factores de seguridad incluidos) entre 3.95 y 5.27 toneladas; ésta sobrepasa fácilmente el requerimiento del PDS. Las terminales del prototipo ensayadas a compresión tuvieron una resistencia máxima de 5.8 y 6.7 toneladas. Tomando el menor valor (5.8 toneladas) obtenemos un factor de seguridad de 2.9 para una resistencia de 2 toneladas admisibles a compresión.

Por otro lado, el nodo ensayado llegó a una resistencia última de 5.5 toneladas y se diseñaron elementos para soportar diferentes magnitudes de carga como la columna del punto 3.5.4. Todos los requerimientos de resistencia, plasmados en el PDS, fueron cumplidos.

5.1.2 Costos. En cuanto a requerimientos de costos se tenía que la fabricación de la terminal no debe costar más de \$20.000 y que un nodo no más de \$80.000. En las tablas a continuación se muestra el costo detallado de éstos.

Tabla 9. Costo de una Terminal

Pieza/Proceso	Costo unitario (\$)	Cantidad/Unidad	Observaciones	Costo (\$)
Disco grande	5.684	1 Unidad	Incluye material y corte	5.684
Platina	3.480	1 Unidad	Incluye material y corte	3.480
Láminas curvas	1.450	6 Unidades	Incluye material, corte y rolado	8.700
Soldadura	13.250	0,2 Horas	Incluye material y mano de obra	2.650
Galvanizado	928	1,3 Kilogramos		1.206
Tornillos autoperforantes C12x1"	93	12 Unidades		1.114
Mano de obra ensamble	3.125	0,05 Horas	Incluye consumo eléctrico	156
Transporte	800	1 Unidad	Costo unitario	800
TOTAL				23.790

Tabla 10. Costo de un Nodo

Pieza/Proceso	Costo unitario (\$)	Cantidad/Unidad	Observaciones	Costo (\$)
Discos	9.280	2 Unidades	Incluye material y corte	18.560
Platinas	3.480	16 Unidades	Incluye material y corte	55.680
Soldadura	25.250	0,20 Horas	Incluye material y mano de obra	5.050
Galvanizado	928	4,8 Kilogramos		4.454
Transporte	800	1	Costo unitario	800
TOTAL				84.544

El costo real de la terminal superó el límite del requerimiento por \$3.790 y el nodo por \$4.544. El nodo costado es el de mayor número de piezas y complejidad por ello los otros nodos cumplirían el requerimiento. Aún así los costos generales del sistema son elevados para el mercado y éste punto se presenta como un punto crítico a mejorar. Las piezas metálicas se cotizaron en la empresa Corte-Aceros que realiza el servicio de corte por láser. Seguramente se pueda bajar el costo aumentando la cantidad de piezas solicitadas. A continuación se muestra como ejemplo, el costo de una estructura en forma de pirámide pentagonal.

Tabla 11. Cotización pirámide pentagonal con guadas de 3m

Material / Proceso		Cantidad / Unidad	Observaciones	Costo (\$)
Piezas metálicas	Corte Láser	1 Servicio	Incluye material y corte	667.000
	Rolado	120 Unidades		6.000
	Soldadura	5,2 Horas	Incluye material y mano de obra	82.680
	Galvanizado	39 Kilogramos		36.099

Material / Proceso		Cantidad / Unidad	Observaciones	Costo (\$)
Guadua	Guaduas	30 Metros lineales	Incluye transporte	180.000
	Trozado	20 Operaciones		8.000
	Recubrimiento	8 Metros cuadrados		31.200
Piezas estándar	Tornillos 3/8" x 1 1/2"	20 Unidades	Incluye arandelas, guaza y tuerca	8.000
	Tornillos C12 x 1"	480 Unidades	Autoperforante cabeza hexagonal	48.000
Ensamble		6 Horas		18.750
Transporte		1 Servicio		30.000
Instalación		1 Horas		3.125
TOTAL				1.118.854

Se cumplen el resto de requerimientos sobre el costo como el uso de la guadua como material principal y uso de solo materiales comerciales; no se cumple el de utilizar procesos productivos comunes en nuestro medio por la necesidad de realizar piezas en corte por láser y debido a esto mismo el sistema aumenta considerablemente su costo.

5.1.3 Peso. Los requerimientos en cuanto a peso era que: una terminal no debe pesar más de 7Kg, el enlace con terminales podía pesar 28Kg máximo y un nodo 10Kg máximo.

Se obtuvo un peso real de 1.3Kg máximo para la terminal y 4.8Kg para el nodo mas pesado aunque otros tipos de nodos llegaron a un peso de 1.5Kg.

El peso de un enlace depende de la suma del peso de la guadua y sus dos terminales y tornillos. 28Kg máximos menos dos terminales corresponde a 25.4Kg para la guadua. El promedio de peso de las guaduas utilizadas fue de 2.6Kg por metro lineal. Quiere decir que podríamos utilizar una guadua de 9.76 metros de largo y cumplir el requerimiento de peso del enlace. Por resistencia admisible no debemos utilizar guaduas de mas de 3.5 metros de largo. El peso de dicha guadua mas sus dos terminales sería de 11.7Kg. Todos los requerimientos de peso fueron cumplidos.

5.1.4 Tiempos. Los requerimientos en cuanto al tiempo se refieren no solo a su rapidez sino también a su facilidad de manufactura y ensamble.

El sistema cumple los requerimientos de que sea prefabricado, que no requiera de habilidades artesanales en ninguna etapa de fabricación (aunque la soldadura puede considerarse artesanal en algunos casos), que el ensamble en obra se haga por medio de pasadores y que no requiera de soldadura.

Existen otros requerimientos de tiempo como que el ensamble de una terminal con la guadua no debe demorar mas de 10 minutos y que el ensamble entre un enlace y un nodo no debe demorar mas de 120 segundos. Se contabilizó el tiempo de ensamble sobre piezas del prototipo y se obtuvo un promedio de 3 minutos y 20 segundos para ensamblar una terminal en una guadua, operación en la cual se requería ubicar los 12 tornillos auto-perforantes. El ensamble entre un enlace y un nodo obtuvo un promedio de 15 segundos.

Los tiempos de construcción, que más bien podrían llamarse de instalación son muy rápidos, se hacen mediante operaciones fáciles de realizar y requiere de muy poca mano de obra. El momento de ensamble con mayor tiempo requerido y dificultad se presenta cuando se unen las piezas metálicas para ser soldadas. Aún así, entre dos personas pudieron ser armados cuatro nodos en media hora y la dificultad se reduciría si las piezas obtenidas del corte CNC tuvieran la tolerancia dimensional necesaria.

5.2 ANÁLISIS DE VARIABLES CUALIFICABLES

5.2.1 Estética. Debido a que la estética es una variable que se califica de manera diferente por cada persona, el sistema se pensó de manera que fuera personalizado al permitir diferentes formas, diferentes acabados y la adición de diferentes materiales. Se diseñaron nodos que permiten diferentes ángulos de ensamble y el acople de dispositivos para ubicar diferentes materiales y sistemas de cerramiento (fachadas y techos) y pisos. Al sistema se le pueden aplicar diferentes acabados según desee el cliente considerando los requerimientos del entorno al cual será sometida la estructura.

Aunque el sistema permite ocultar la guadua si desea, es ésta misma la que le da un factor diferenciador sobre cualquier otro sistema de construcción y de hecho, ayuda a reforzar con su mera imagen que el sistema es ambientalmente amigable.

5.2.2 Versatilidad. Los anteriores argumentos sobre diferentes geometrías y permitir ubicar cerramientos y cubiertas de diferente tipo además de apuntar a una necesidad estética, apuntan a una necesidad de funcionalidad, pues hacen que el sistema pueda ser aplicado a una mayor diversidad de tipos de construcciones.

El sistema se hace más versátil y durable cuando a sus partes son reemplazables. De hecho la versatilidad del sistema está dada en parte por el hecho que pueda ser desarmado y armado cuantas veces se requiera; de esta manera se abren las puertas a nuevas posibilidades de construcción como las estructuras temporales en ferias y eventos.

El sistema tiene la potencialidad de ofrecer un tipo de estructura para casi cualquier necesidad y por ello se diseñaron diferentes tipos de columnas y vigas;

da la posibilidad de pensar incluso en estructuras a las que pocos sistemas de construcción tienen acceso, como por ejemplo sistemas de transporte masivo tipo teleférico o grandes montañas rusas.

5.2.3 Medio ambiente. El sistema cuenta con la gran característica de ser amigable con el medio ambiente por diversas razones. Utiliza a la guadua como materia prima principal, la cual posee la característica de renovable superior a los metales, cementos, plásticos e incluso otras maderas. La guadua angustifolia, que ha sido calificada por expertos como una de las mejores especies de bambú para ser utilizadas en la construcción, posee su mayor territorio en Colombia, hecho que puede significar ventajas socio-económicas en un futuro.

Las buenas propiedades de inercia, radio de giro y relación resistencia/peso de la guadua, como se ha visto en capítulos anteriores, significan una reducción de la cantidad de material necesario para lograr estructuras en comparación con cualquier otro material; punto importante para el manejo sostenible y la reducción del impacto ambiental. Adicionalmente, un menor peso significa un menor consumo de combustible y emisión de gases durante el transporte.

Si una estructura estuviera expuesta al sol en un ambiente interior que necesita refrigeración, la estructura en guadua representaría un ahorro energético durante toda la vida de la edificación en comparación con una estructura metálica pues la primera posee baja conductividad térmica y la segunda una alta.

Por último, el sistema logra la resistencia necesaria para una edificación específica utilizando menor cantidad de guadua que una construcción tradicional en guadua pues ésta última posee menor resistencia en las uniones.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se sugieren utilizar guaduas rollizas comerciales de diámetros entre 11 y 12 centímetros sin signos de pudrición o rajaduras.

Se sugiere fabricar por lo menos cuatro dimensiones diferentes de terminales, una para guaduas de diámetro exterior entre 10.5 y 11cm, otra ente 11 y 11.5cm, otra ente 11.5 y 12cm y otra entre 12 y 12.5cm.

Para aumentar la resistencia o el factor de seguridad del sistema lo primero que se debe hacer es aumentar la especificación del pasador.

Hace falta un estudio estadístico sobre piezas sometidas a ensayos para determinar la resistencia y utilizar dichos datos en cálculos estructurales.

La resistencia a tensión y a flexión no fue determinada, a pesar de que se piensa que deben tener un buen comportamiento, hace falta realizar dichos ensayos para realizar diseños y cálculos estructurales con el sistema.

Gracias a su resistencia, que es 3 veces superior al sistema de construcción tradicional en guadua, se utilizan la mitad de las guaduas requeridas para una construcción del mismo tipo y se logra disminuir el sobre-dimensionamiento aparente o visual de las mismas.

En una estructura bajo las mismas condiciones de carga el sistema pesa el 60% de una estructura metálica y cerca de 100 veces menos que una en concreto reforzado.

El bajo peso del sistema reduce los requerimientos de cimentación en una construcción, disminuye las emisiones de gases durante el transporte, disminuye la inercia mecánica durante un sismo y lo hace más fácil de instalar.

La flexibilidad dada por el bajo módulo de elasticidad de la guadua y su alta resistencia en las uniones lo convierten en un sistema que se comporta mejor durante un sismo.

El uso de elementos estructurales huecos, de buena relación resistencia / peso y de estructuras tipo cercha, permitieron que el peso final fuera muy bajo. Este bajo peso permite reducir las especificaciones necesarias de una cimentación y reducen la inercia mecánica durante un sismo.

El sistema compite mano a mano con las estructuras metálicas de rápido ensamble en tiempos de instalación. Ello permite su introducción a diferentes mercados como el de estructuras temporales.

El sistema reduce los costos de la mano de obra al disminuir la artesanidad (habilidad manual requerida) y al utilizar procesos realizados por máquinas. En el costo final, alrededor del 18% representan costos de mano de obra.

El sistema puede ser un 26% más costoso que una estructura metálica para las mismas condiciones de carga. Dicho sobre costo puede justificarse por razones ambientales y funcionales ya mencionadas. No obstante su costo puede ser disminuido con sistemas de producción en serie.

La guadua puede tener una excepcional resistencia a tensión, compresión y flexión pero existe una dificultad práctica para poner a trabajar una guadua a tensión o flexión puras sin repercutir negativamente en la industrialización de la unión. Debido a lo anterior, hoy la resistencia de las uniones a tensión y flexión no

son tan altas como podrían ser (cerca de 46 veces más para sistemas no artesanales).

El uso de la guadua no debe ser exagerado y debe utilizarse en condiciones para las cuales su desempeño es óptimo. En una estructura se debe considerar el uso de diversos materiales.

Los recubrimientos sobre las partes deben ser los adecuados para el ambiente al cual estarán expuestos. Por ejemplo pintura de buena adherencia y cubrimiento con protección a los rayos UV sobre las guaduas que reciben sol y galvanizado en caliente para piezas metálicas en ambientes corrosivos. En ambientes exteriores debe haber un monitoreo periódico sobre el estado de las guaduas.

Ampliar la utilización de la *Guadua angustifolia*, haciéndolo con calidad, brindará ventajas comparativas y competitivas únicas en Colombia.

Hace falta recorrer un largo camino de investigación y de prácticas en la cadena productiva de la guadua para controlar variables de calidad de la misma y poderla estandarizar y clasificar según su calidad y uso.

El sistema desarrollado busca que las personas trasciendan la percepción de la guadua como material precario y desechable hacia material de altas prestaciones.

El sistema es una respuesta a las nuevas demandas de los mercados en lo referente a la construcción, tanto funcionales, medio ambientales y estéticas. Es así como busca la reducción de los tiempos de construcción, la utilización racional de materiales y propone nuevas estéticas que sugieren un gusto que mezcla lo natural, lo tecnológico, lo pulido y lo rústico.

El hecho de que los elementos sean prefabricados y de fácil instalación en obra logran reducir los tiempos de construcción considerablemente.

Todas las decisiones tomadas que buscaron aumentar la calidad y disminuir los tiempos se reflejaron en los costos; se redujo el costo de la mano de obra pero se aumentó el costo en general principalmente por el uso de corte por láser. Para disminuir los costos se debe buscar optimizar uso de corte por láser o utilizar procesos que lo reemplacen. El factor costo limita la versatilidad del sistema.

El sistema facilita la mano de obra tanto en lo referente a trabajo con guadua como en la construcción misma. A diferencia de la mayoría de los sistemas constructivos en guadua existentes, no requiere de personas con habilidad artesanal en ninguna de las etapas (manufactura, prefabricación e instalación).

El sistema constructivo desarrollado es versátil pues pueden edificarse estructuras para diferentes fines tales como cubiertas con grandes luces, fachadas, pabellones, viviendas, pérgolas, estructuras temporales como stands e incluso mobiliario. La viabilidad en uno u otro campo depende de diversos factores como el costo y el gusto del comprador.

Este es el comienzo de un nuevo sistema de construcción en guadua que a través del tiempo es susceptible de mejorar ampliando sus posibilidades cada vez más.

BIBLIOGRAFÍA

Advance bamboo applications. [Sitio en Internet]. <http://www.conbam.de/>

AGUDELO, B., TORO, I. Evaluación del desarrollo de los bosques de *Guadua angustifolia* en la zona de jurisdicción de la CVC, bajo diferentes condiciones de sitio, con fines de reforestación. Tesis, Universidad del Tolima. Ibagué. 1994.

AIS. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá, 2001.

AIS. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. NSR-98. Manual de Construcción Sismo Resistente de Viviendas en Bahareque Encementado. Bogotá, 2002.

CAMACHO, Víctor Manuel y PÁEZ, Isduar Humberto. Estudio de Conexiones en *Guadua* Solicitadas a Momento Flector. Bogotá, 2002. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

CAMARGO, Juan Carlos. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunt in the Coffee Region of Colombia. PhD. Tesis. Göttingen Universität. Cuvillier, Verlag, Göttingen, Deutschland. 2006.

CAMARGO, Juan Carlos; GARCÍA, Jorge Hugo; MORALES, Tito. Cambios en la productividad de rodales naturales de *Guadua* (*Guadua angustifolia* Kunt) bajo diferentes condiciones de sitio y de manejo silvicultural en el eje cafetero de Colombia. In: Proceedings VI international seminar on environmental and sustainable development. Bogotá, Colombia. Octubre 8 al 10 de 2003.

CASTAÑO, Francisco y MORENO, Rubén Darío. Guadua para todos: cultivo y aprovechamiento. Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), 2004.

CASTRILLÓN, Brigitte Matilde y MALAVER, Diego Mauricio. Procedimientos de Ensayos para la Determinación de las Propiedades Físico Mecánicas de la Guadua. Bogotá, 2004. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

CLAVIJO, Sandra y TRUJILLO, David. Evaluación de Uniones a Tracción en Guadua. Bogotá, 2000. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

CRUZ, H. La Guadua Nuestro Bambú. Corporación Autónoma Regional del Quindío y Centro Nacional de Estudio para el Bambú Guadua. Armenia, Quindía, Colombia. 1994.

EL TIEMPO. Artículo: "Ingenio colombiano levanta edificios de forma Express en España". Bogotá, Miércoles 2 de abril de 2008.

Esferas tipo MERO. [Sitio en Internet]. <http://www.mero.com>

GARCÍA, Jorge Hugo. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunt), orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. 2004.

GARZÓN, Jenny. Optimización de estructuras en guadua. Bogotá, 1996. Proyecto de Grado de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia.

GIRALDO, Edgar y SABOGAL, Aureliano. Una alternativa sostenible: La Guadua. Tercera Edición actualizada. Colombia, Noviembre de 2007

GNANAHARAN, R. Physical and strength properties of *Dendrocalamus strictus* grow in Kerala, India. 1991.

GONZÁLES Eugenia y DÍAZ, John Fernando. Parámetros de diseño para construir en guadua. 1992.

GONZÁLES Eugenia y DÍAZ, John Fernando. Propiedades Físicas y Mecánicas de la Guadua. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

GUTIERREZ, Juan Vidal y GOMEZ, Raúl Andrés. Diseño y elaboración a escala natural de armaduras en guadua *angustifolia*. Bogotá, 2002. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Bamboo the Gift of the Gods. Primera Edición de 2003. Bogotá, Colombia.

JARAMILLO, Diego León y SANCLEMENTE, Ana Gisella. Estudio de Uniones en Guadua con Inclinación entre Elementos. Bogotá, 2003. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

Lanik estructuras espaciales. [Sitio en Internet]. <http://www.lanik.com/>

LONDOÑO, Ximena. La Guadua. Revista Procaña. 1996.

LONDOÑO, Ximena. Diplomado Internacional Gestión Integral de la Guadua *angustifolia*. Universidad Tecnológica de Pereira. 2 de Febrero de 2009.

MONTOYA, Jorge Augusto y OROZCO, Carlos Alberto. Fundamentos prácticos del Secado de la Guadua - Bambú. Primera edición. Pereira, Colombia, 2008.

MUÑOZ MUÑOZ, Harold Alberto. Aceros Diaco; Manual de diseño y construcción de diseño sismorresistente NSR-98. Edición 2000.

Novum Structures. [Sitio en Internet].

<http://www.novumstructures.com/novum/index.html>

OBERMAN, Tim Martin y LAUDE, Ronald. Bambú: Recurso sostenible para estructuras espaciales. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2004.

PANTOJA, Nelson Hernando y ACUÑA, Diego Fernando. Resistencia al Corte Paralelo a la Fibra de la Guadua angustifolia. Bogotá, 2005. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

PEÑA, Cesar y RODRÍGUEZ, Hugo. Propuesta de Uniones Mecánicas para Estructuras de Guadua. Bogotá, 1997. Proyecto de Grado de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia.

PORTAFOLIO. 18 de febrero de 2008. p. 22

URIBE, Maritza y DURÁN, Alejandro. Estudio de Elementos a Compresión Armados por tres Guaduas. Bogotá, 2002. Proyecto de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

Wallner Automation GmbH, Alemania. [Sitio en Internet]. <http://www.bambutec.org>

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

ARRIAGA, E. Panorama actual de la guadua angustifolia kunth en Colombia. Revista de la escuela colombiana de ingeniería. 2007. Volumen 017. Número 0065.

CASTRO, Dicken. La Guadua. 1985.

COLORADO, A. Planta de guadua, realidad en el eje cafetero. Revista M y M: El mueble y la madera. 2005. Número 0048.

CRUZ, R. y HERNÁNDEZ, J. Comportamiento estructural de la guadua en Santander. Tecnura: tecnología y cultura afirmando el conocimiento. 2004. Volumen 008. Número 0015.

GONZÁLEZ, C. OSORIO, J. GARCÍA, E. Resistencia a la flexión de la guadua agustifolia kunt a escala natural. Revista facultad nacional de agronomía (Universidad Nacional de Colombia). 2002. Volumen 055. Número 0002.

HOYOS S, CARDENAS E, PRECIADO H. Aprovechamiento industrial de la guadua bajo el concepto de cero emisiones. 1998.

LÓPEZ, M. TRUJILLO, David. Diseño de uniones y elementos en estructuras de guadua. Colombia. 2000.

OSORIO J, CIRO H, VÉLEZ J. Efectos de algunos parámetros físicos y geométricos en la resistencia de diseño a flexión de la guadua angustifolia. DYNA: Revista de La Facultad de Minas. 2005. Volumen 072. Número 0145.

OSORIO, J. CIRO, H. Influencia de parámetros físicos en la resistencia de diseño a compresión de la guadua angustifolia kunth. DYNA: Revista de la facultad de minas. 2005. Volumen 072. Número 0147.

RESTREPO, Alejandro. Sistema tridimensional para estructuras en guadua. Colombia. 2003.

SALAZAR, J. Comportamiento de columnas en guadua. Ingeniería e investigación. 1983. Número 0006.

SÁNCHEZ, N. Normas que promueven la propagación del uso de la guadua. Normas y calidad. 2006. Volumen 021. Número 0069.

TAKEUCHI, C. Comportamiento estructural de la guadua angustifolia: uniones en guadua. Ingeniería e investigación. 2004. Número 0055.

TAKEUCHI, C. y GONZÁLEZ, C. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad. Ingeniería y universidad. 2007. Volumen 011. Número 0001.

VÉLEZ, Simón. Bamboo: Grow your own house. Germany. 2000.

VILLEGAS M, ARANGO E, MUTIS S, MANZUR D, VELEZ S. Bambusa, guadua. 1989

VILLEGAS, Marcelo et al. Guadua arquitectura y diseño. Ciudad: Editorial; 2003.

ANEXO A

SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN REPRESENTATIVOS

Se realizó un recorrido por el estado del arte en la construcción con el fin de tomar ideas destacadas y aplicables para el proyecto y también para luego realizar comparaciones con el sistema diseñado.

Podemos clasificar a las construcciones de muchas maneras, por la forma en que se construyen, los materiales que utilizan, las características que poseen, su aplicación, su desempeño, etc. Un sistema de construcción es una combinación de subsistemas de estructura, cubiertas, fachadas, techos y pisos.

Algunos sistemas de construcción. A continuación veremos algunos subsistemas existentes y utilizados en el mundo.

- **Casa Molecule.**

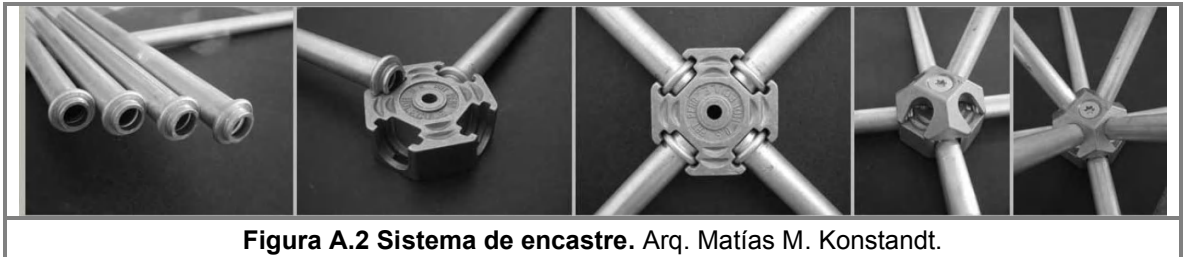


Figura A.1 Casa Molecule. Arq. Matías M. Konstandt.

La Casa Molecule ³⁴ es una vivienda desarrollada por el arquitecto argentino Matías M. Konstandt. Su principal desarrollo consiste en la estructura armable tipo

³⁴ <http://www.molecule.com.ar/>

cercha compuesta por tubos y nudos en aluminio que generan la fortaleza necesaria con muy bajo peso.



La simpleza del ensamble y los materiales utilizados permiten que casi cualquier persona pueda armar y desarmar estructuras resistentes en cualquier clima y tipo de suelo. La estructura pesa tan solo 4 kilogramos por metro cuadrado en un espesor de 25 centímetros y permite construir estructuras móviles para stands, mobiliario y esculturas.

100 metros cuadrados pesan solo 400 kilogramos y ocupan un volumen de 0,55 metros cúbicos, permitiendo esto construir en lugares remotos. Con un solo tornillo se pueden fijar hasta 12 tubos por nudo.

Ventajas:

- Bajo tiempo de construcción.
- Fácil de construir.
- Posibilidad de construir en terrenos de poca resistencia y lugares remotos.
- Versatilidad de la estructura que permite utilizarse para diversos fines como por ejemplo mobiliario o stands.

Desventajas:

- Alto costo por el uso de aluminio.
- Su alta conductividad térmica produce cambios dimensionales en la estructura y por ello no se deben anclar a ésta, elementos rígidos.

- No se puede utilizar como estructura principal de edificaciones debido a su resistencia.

- **Steel Built.**



Figura A.3 Construcciones realizadas con el sistema SteelBuilt.

Steel Built ³⁵ es una empresa española que toma como base sistemas de construcción de otros países vanguardistas. Realiza construcciones Steel Framing o de estructura metálica.

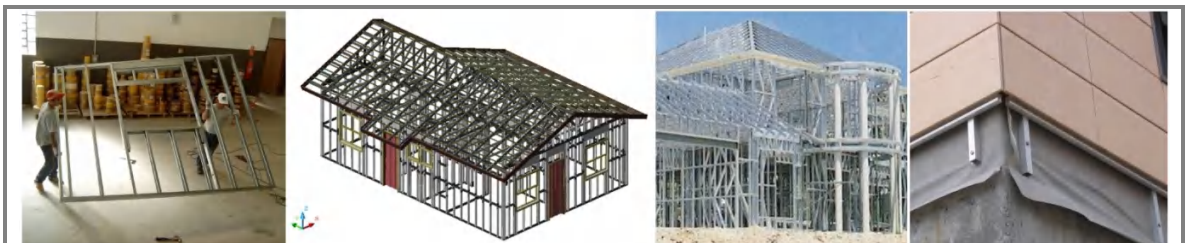


Figura A.4 Construcciones realizadas con el sistema SteelBuilt.

El sistema permite reducir la mano de obra, una mayor facilidad en instalaciones sanitarias y eléctricas y buena flexibilidad en el diseño arquitectónico. Utiliza principalmente acero galvanizado permitiendo su reciclaje, resistencia climática y menor costo que otros materiales de características similares.

Ventajas:

- Bajo tiempo de construcción.

³⁵ <http://www.steelbuilt.es/>

- Mayor facilidad de realizar instalaciones sanitarias, eléctricas y otros.
- Facilidad en el cambio de fachadas y recubrimientos.

Desventajas:

- Alto costo.
- Construcción que requiere de profesionales especializados.
- Requiere de aislamiento acústico y térmico adicional.

• **Louisiana Pacific.**



Figura A.5 Construcciones realizadas con el sistema Louisiana Pacific.

Louisiana Pacific ³⁶ es una empresa que fabrica y ofrece comercialmente productos para la construcción tales como tableros estructurales, revestimientos exteriores, vigas de ingeniería en madera y otros productos en madera.



Figura A.6 Construcciones realizadas con el sistema Louisiana Pacific.

Los productos que ofrecen para la estructura son compuestos de madera maciza y aglomerados de madera aglutinados con formaldehídos que no son apropiados

³⁶ <http://www.lpcorp.com/> y <http://www.lpchile.cl/>

para la humedad. Por esto los recubrimientos de la estructura deben ser prácticamente herméticos.

Ventajas:

- Posibilidad de construir en terrenos de poca resistencia por su bajo peso.
- Mayor facilidad de realizar instalaciones sanitarias y eléctricas.

Desventajas:

- Alto costo.
 - Construcción que requiere de profesionales especializados.
 - Requiere un excelente aislamiento a la humedad adicional para que no se vea afectada su durabilidad.
 - Requiere aislamiento que evite riesgo de fuego pues los materiales utilizados son combustibles.
- **Hispalyt.**³⁷ es una asociación española de fabricantes de ladrillos y tejas de arcilla cocida que, desde su creación, se ha preocupado por desarrollar nuevos productos con base en este proceso y nuevos sistemas constructivos



Figura A.7 Sistema *Structura* de Hispalyt.

Poseen dos sistemas de construcción diferentes: Structura y Silensis. El sistema Structura mejora las prestaciones higrotérmicas generando un ahorro energético y aumentando la durabilidad.

³⁷ <http://www.hispalyt.es/>

Ventajas:

- Ahorro energético durante la vida del edificio por su buen aislamiento térmico.
- Mayor durabilidad que la construcción en mampostería tradicional.
- Mayor aislamiento acústico que la construcción tradicional.

Desventajas:

- Mayor costo que la construcción en mampostería tradicional.
- Construcción que requiere de profesionales especializados.
- Construcción muy pesada que necesita mucha cimentación o no es viable de realizarse en terrenos de poca resistencia.

• **Mampostería tradicional.**



Figura A.8 Mampostería.

La mampostería es el sistema tradicional de construcción con ladrillos, bloques de cemento prefabricados y/o piedras talladas o naturales que generalmente son unidos con mortero.



Figura A.9 Construcciones en mampostería.

Existen dos sistemas de construcción principales en mampostería. La más común en nuestro medio es la mampostería confinada; consiste en armar los muros de ladrillos dentro de un esqueleto o estructura (columnas y vigas) hecha de concreto reforzado con barras de acero. El otro tipo es la mampostería reforzada; en ésta los muros de ladrillo hueco son reforzados introduciéndoles barras de acero y anclándolos con concreto de relleno. Posee un peso promedio de 172 kilogramos por metro cuadrado en mampostería de ladrillo mambrón y puede reducirse hasta 78 kilogramos por metro cuadrado en mampostería de bloque alivianado de 10cm.

Ventajas:

- Tipo de construcción muy estandarizada que todo constructor conoce.
- Costos asequibles.
- Alta resistencia al fuego.
- Excelente durabilidad.
- Buen aislamiento térmico.

Desventajas:

- Construcción muy pesada que necesita mucha cimentación o no es viable de realizarse en terrenos de poca resistencia.
- Mala resistencia sísmica debido a la rigidez de los materiales y la manera como están dispuestos. Para tener buena resistencia sísmica necesita de un diseño apropiado y una utilización de gran cantidad de material.
- Dependiendo de cómo se realice, puede tener muy mal aislamiento acústico.
- Construcción que requiere de mucho tiempo.
- Construcción que requiere de un gran gasto energético y esfuerzo de sus obreros debido al gran peso de sus materiales.

- **Chapa de encofrar.**

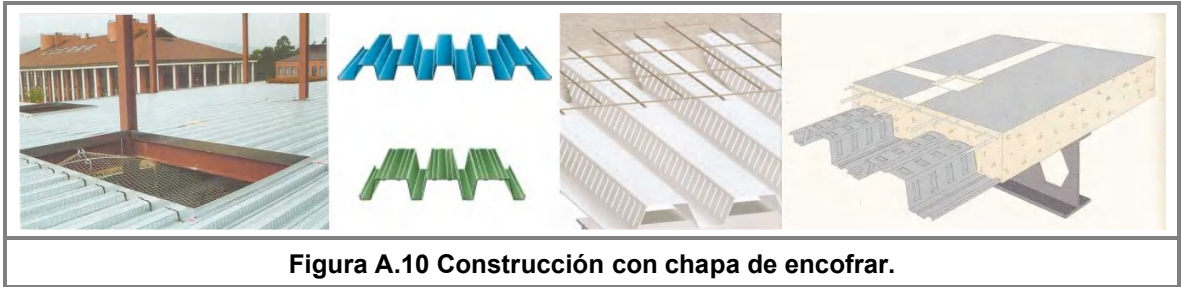


Figura A.10 Construcción con chapa de encofrar.

La chapa de encofrar es un método alternativo de construcción, utilizado en ocasiones en la mampostería confinada generalmente para la formación de losas. Se utilizan láminas metálicas galvanizadas con geometrías que permiten mantener la resistencia adecuada reduciendo la cantidad de concreto reforzado necesario.

La apariencia por la parte superior en una losa de éste tipo es igual a una losa hecha por mampostería tradicional, pero por la parte inferior queda a la vista la chapa metálica y por ello, cuando no se desee visualizar, se recurre a la utilización recubrimientos tipo drywall.

Ventajas:

- Tipo de construcción muy conocida hoy.
- Costos asequibles.
- Buena resistencia al fuego.
- Buena durabilidad.

Desventajas:

- Construcción pesada que necesita mucha cimentación o no es viable de realizarse en terrenos de poca resistencia.
- Dependiendo de cómo se realice, puede tener muy mal aislamiento acústico y térmico.
- Construcción que requiere de mucho tiempo aunque menos que la mampostería tradicional.
- Construcción que requiere de un gran gasto energético y esfuerzo de sus obreros debido al gran peso de sus materiales.

- **Drywall.**



Figura A.11 Construcción con drywall.

El drywall es un método de recubrimiento interior o exterior de paredes y techos con paneles generalmente de yeso con fibra que cubren toda el área, luego se estucan y se pintan, brindando un acabado similar al de una pared en mampostería revocada y pintada. Es de relativo bajo peso, rápido y puede ser utilizado en diversos tipos de construcción.

Ventajas:

- Es un tipo de recubrimiento estandarizado y muy utilizado con muy buena oferta y demanda.
- Buena resistencia al fuego.
- Buena durabilidad si se cuida de los golpes.
- Buen aislamiento térmico.
- Buen aislamiento acústico.
- Menor peso que la mampostería.

Desventajas:

- Costo.
- Requiere de mano de obra calificada.
- El tiempo de construcción no es muy rápido.

- **Encofrado.**



Figura A.12 Construcción con encofrados.

El encofrado es una técnica para el formado de concreto u hormigón en moldes. Permite generar cualquier geometría, pero requiere de la construcción previa de los moldes requeridos.

Existen diversos métodos y combinaciones de encofrado. El sistema de encofrado tradicional en nuestro medio es el de formaletas; en éste los moldes son hechos de madera rústica. Existe un método llamado encofrados perdidos en el cual el material que sirve como molde queda como parte de la obra ³⁸.

Ventajas:

- Bajos tiempos de construcción.
- Permite generar geometrías complejas según el molde utilizado.
- Excelente resistencia al fuego.
- Excelente durabilidad.

Desventajas:

- Requiere de mano de obra calificada.
- Altos costos iniciales debido a los moldes.
- Construcción pesada que necesita mucha cimentación o no es viable de realizarse en terrenos de poca resistencia.
- Dependiendo de cómo se realice, puede tener muy mal aislamiento acústico.

³⁸ <http://es.wikipedia.org/wiki/Encofrado>

- **Forsa.**



Figura A.13 Construcciones realizadas por Forsa.

Forsa ³⁹ es una empresa Colombiana con reconocimiento internacional que construye edificaciones en concreto a base de encofrados con moldes de aluminio. El proceso permite una construcción rápida; según el proyecto, se puede construir una vivienda por día.



Figura A.14 Construcciones en realización. Sistema Forsa.

La empresa se encuentra ahora en España realizando proyectos de construcción de vivienda (apartamentos) para lo cual se vale de obreros colombianos. Los moldes de aluminio para el encofrado son de máximo 30 kilogramos para ser manipulados por una persona. Estos moldes pueden ser utilizados unas mil quinientas veces sin alterarse. El ahorro en tiempo en comparación con la construcción tradicional es del 30 al 40 por ciento ⁴⁰.

Ventajas:

- Bajos tiempos de construcción.
- Excelente resistencia al fuego.
- Excelente durabilidad.

³⁹ <http://www.forsa.com.co/>

⁴⁰ EL TIEMPO. Artículo: "Ingenio colombiano levanta edificios de forma exprés en España", Bogotá, Miércoles 2 de abril de 2008.

- Menor peso que la mampostería tradicional.

Desventajas:

- Requiere de mano de obra calificada.
- Altos costos iniciales debido a los moldes pero se amortizan debido a la cantidad de proyectos realizados sin cambiar de moldes.
- Construcción pesada que necesita mucha cimentación o no es viable de realizarse en terrenos de poca resistencia.
- Poca libertad de diseño debido que se deben utilizar los moldes existentes.

- **Kalzip.**



Figura A.15 Construcciones con cerramientos Kalzip.

Kalzip ⁴¹ es una empresa española especializada en recubrimiento exterior de edificaciones (techos y fachadas). El sistema permite cubrir geometrías complejas, es liviano, fuerte, duradero, resistente a la intemperie y casi libre de mantenimiento. Buen aislamiento térmico y acústico. Se puede desmontar y reciclar.



Figura A.16 Construcciones con cerramientos Kalzip.

⁴¹ <http://www.kalzip.com/>

Es un sistema que ha instalado más de 80 millones de metros cuadrados en diferentes países y en las edificaciones con mayor reconocimiento internacional, arquitectónicamente hablando.

Ventajas:

- Permite cubrir geometrías complejas.
- Buena resistencia al fuego.
- Buena durabilidad.
- Buen aislamiento térmico.
- Buen aislamiento acústico.
- Bajo peso, mucho menor que un muro en mampostería.

Desventajas:

- Alto costo.
- Requiere de mano de obra calificada.
- Necesita de unos requerimientos especiales en el sitio de la construcción.
- No permite la personalización en acabados, solo el cambio de color en las láminas.

• **MERO system y otros sistemas similares.**

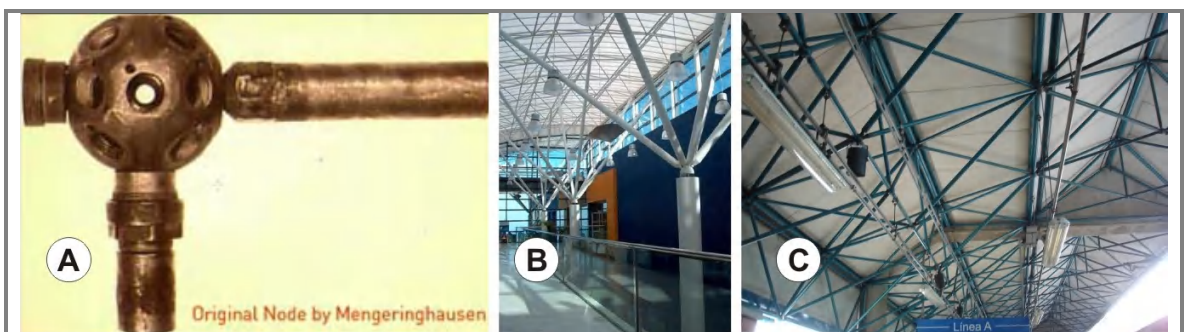


Figura A.17 Sistema MERO, Proyectos alrededor del mundo.

A. Nodo original diseñado por Mengerlinghausen; B. Estructura de la empresa Lanik⁴²;
C. Estructura de cubierta, Estación del Metro de Medellín.

⁴² <http://www.lanik.com/>

El sistema MERO fue desarrollado en los años 30 por el alemán Max Mengerlinghausen Rorhbauweise con la idea de aprovechar los procesos industriales existentes para el desarrollo de sistemas de estructura. La esfera de metal fundido consta de perforaciones roscadas en ángulos específicos, puede permitir el ensamble de hasta 18 miembros estructurales. En sus comienzos la esfera metálica fue utilizada fundamentalmente para formar andamios y luego paso a formar estructuras fijas (ver figura A.17). El sistema es considerado como una de las grandes contribuciones a la tecnología estructural en el siglo veinte.

La esfera mero presenta dos desventajas fundamentales, su alto costo y su dificultad de ensamble. El costo de una esfera se encuentra entre \$60.000 y \$250.000 según su tamaño. El ensamble es difícil por dos cuestiones. Primero, encontrar la geometría de una estructura es difícil debido a que la forma esférica regular no indica como ubicarla en la obra. Segundo, el ensamble se hace mediante unas barras roscadas (espárragos) las cuales deben estar introducidas en los tubos al momento de ubicarse y luego son sacados para roscar en las esferas metálicas. Hay que tener en cuenta que dicha apreciación sobre la dificultad de ensamble, está hecha con base en una experiencia personal y quizás dichas dificultades ya estén resueltas.

A partir de las esferas metálicas, su creador formó la empresa Mero, hoy llamada Novum Structures⁴³; cuentan con varios sistemas de estructura adicionales.



Figura A.18 Sistemas de estructura de la empresa Novum Structures.
A. Sistema Block Knoten (BK-system); **B.** Sistema Free Form (FF-system).

⁴³ <http://www.novumstructures.com/>

Ventajas:

- Permite generar estructuras con geometrías diversas.
- Elimina la necesidad de soldadura en el momento de la obra.
- Permite construir cubiertas con grandes luces.
- Peso menor al de la mampostería.
- Excelente resistencia sísmica.

Desventajas:

- Alto costo.
- Dificultad de ensamble.

• Casas prefabricadas en concreto.



Figura A.19 Casas prefabricadas en concreto.

Son realizadas con bloques de concreto prefabricados que miden generalmente 1 x 1m y unos 3.2cm de espesor que se unen y ensamblan con parales en lámina. Sus cimientos generalmente son una placa de concreto reforzado de 10cm. Las cubiertas de techo pueden ser diversas. Las casas son entregadas en obra gris, sin acabados ni instalación de aguas ni electricidad y usualmente los cimientos y el transporte también corren por cuenta del cliente.

Ventajas

- Bajo tiempo de construcción.
- Construcción de relativo bajo costo.

Desventajas

- Poco aislamiento térmico.
- Poco aislamiento acústico.

- **Tapia.**



Figura A.20 Muros de tapia.

Fue una técnica muy utilizada antiguamente en toda la cuenca del mar mediterráneo. Llamada tapia en Iberoamérica y tapial en España y en el mediterráneo a la técnica de construir muros rellenando encofrados con capas de tierra que se van compactando con pisones. El encofrado consiste normalmente en dos tablas paralelas unidas por un travesaño, luego de que se llena el encofrado se desmonta y se ubica en una nueva posición. Comparado con otras técnicas que utilizan el barro en estado más húmedo, la técnica del tapial posee una retracción mucho más baja y mayor resistencia.

Existen diversas técnicas de tapial, tales como el tapial monolítico, el tapial de adobes y tapiales con refuerzo (en la última imagen a la derecha de la figura A1.20 se puede observar un sistema de bloque machihembrados). La resistencia de un muro de tapia varía según diversas variables tales como el espesor del muro, su forma y la disposición de refuerzos internos si los tiene; residencias de dos plantas con muros de tapia con buenas especificaciones en Mendoza, Argentina han resistido más de 150 años y los sismos ocurridos.



Figura A.21 Varios tipos de tapia.

Ventajas

- Excelente control de temperatura en el interior de la construcción y en especial para climas fríos.
- Utiliza materiales que provee el mismo sitio de construcción (Tierra).
- Excelente aislamiento acústico.

Desventajas

- Requiere de gran esfuerzo físico y/o maquinaria.
- Requiere de mucho tiempo para realizarse.
- Requiere de conocimientos especializados que dificultan su aplicabilidad.
- Los muros resultantes son muy pesados (un promedio de dos toneladas por metro cúbico)

• Bahareque.



Figura A.22 Casas fabricadas en bahareque.

Es un sistema de construcción milenario. Consiste en un envarado o tejido de palos de madera (usualmente guaduas) recubiertos con barro. Existen de muchos tipos; en algunos países latinoamericanos como Ecuador y Perú dicha técnica de construcción es llamada quincha, en cuyo caso el entramado es hecho en bambú.

Existe una técnica llamada bahareque encementado en la cual los muros, en lugar de barro poseen un revoque sobre malla metálica; dicho sistema de construcción ya está contemplado en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-resistente y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) posee un manual de construcción sismo resistente de viviendas de bahareque encementado. La flexibilidad de este sistema constructivo le permite aguantar mejor las fuerzas de un sismo en comparación con otras técnicas que utilizan la tierra como por ejemplo la tapia e incluso que construcciones en mampostería. Las cualidades de las viviendas en bahareque se están dando a conocer y se están realizando construcciones con dicha técnica a pesar de su historial de fama de viviendas precarias.



Figura A.23 Construcción de casas en bahareque, Unidad Residencial La Aldea. Municipio de La Estrella.

Ventajas

- Excelente control de temperatura en el interior de la construcción.
- Utiliza materiales que provee el mismo sitio de construcción (Tierra).
- Excelente aislamiento acústico.
- Su flexibilidad le da muy buena resistencia sísmica.
- Menor impacto ambiental que otros sistemas de construcción.

Desventajas

- Las construcciones en bahareque son conocidas como precarias y por ello no son muy difundidas.
- El revocado en tierra tiende a desprenderse con el tiempo.
- Requiere de gran esfuerzo físico y/o maquinaria.
- Requiere de mucho tiempo para realizarse.

Conclusiones sobre los sistemas de construcción existentes.

- Existen sistemas de cerramiento tanto interiores como exteriores (paredes, muros y techos) que brindan buenas soluciones en cuanto a diferentes aspectos, como por ejemplo el peso, que pueden ser utilizados para el proyecto.
- En general, las construcciones existentes en el mundo requieren de largos tiempos para su realización.
- Las construcciones que requieren de menor tiempo para realizarse generalmente presentan un sobre costo.
- El sector de la construcción está enfocándose más cada día en un manejo ambiental adecuado y éste será un factor imprescindible en un futuro.
- Existen sistemas de construcción antiguos que presentan ventajas interesantes y que pueden ser utilizadas para ciertas aplicaciones y nuevos desarrollos en cuanto a sistemas de construcción.

ANEXO B

ALGUNAS INVESTIGACIONES YA REALIZADAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA

A continuación se expondrán resultados de algunas investigaciones ya realizadas que representaron una referencia para determinar promedios y valores admisibles para el proyecto.

- **Edgar Giraldo Herrera y Aureliano Sabogal Ospina. *Una alternativa sostenible: la Guadua*. Tercera Edición actualizada noviembre de 2007.**

Realizan pruebas en las que se toman las condiciones de ensayo de las normas colombianas sobre maderas, establecidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC y las normas de la American Society for Testing and Materials, ASTM.

Tabla 12. Resistencia mecánica de la guadua: Edgar Giraldo Herrera y Aureliano Sabogal Ospina. Una alternativa sostenible: la Guadua. Tercera Edición actualizada noviembre de 2007

Prueba	Dimensiones de la probeta	Resultados
Ensayo de compresión paralela a la fibra	Longitud variable entre 15 y 30cm. Diámetro interno variable (entre 6 y 8cm). Diámetro externo variable (entre 8 y 11cm).	Resistencia a la compresión en el límite proporcional (Kg/cm^2) = 420.2
		Resistencia máxima a la compresión (Kg/cm^2) = 512.35
		Módulo de elasticidad (Kg/cm^2) = 78561
Ensayo de flexión estática	Diámetro interno variable (entre 6 y 8cm). Diámetro externo variable (entre 8 y 11cm). Longitud 100cm. Distancia entre apoyos 91.5cm.	Resistencia a la flexión (Kg/cm^2) = 149.08
		Resistencia máxima a la flexión (Kg/cm^2) = 269.08
		Módulo de elasticidad (Kg/cm^2) = 31990

- **Eugenia Gonzáles y John Fernando Díaz. *Parámetros de diseño para construir en guadua.***

Resultado promedio para los esfuerzos de 4 zonas tomando guadua macana: Valle del Río Cauca, Quindío, Risaralda y Antioquia.

Tabla 13. Resistencia mecánica de la guadua: Eugenia Gonzáles y John Fernando Díaz. Parámetros de diseño para construir en guadua.

Prueba	Peso específico	Resultados
Compresión	0.6g/cm ³	Resistencia en el límite proporcional (RPL) = 178Kg/cm ² Esfuerzo de carga máxima (MOR) = 343Kg/cm ² Módulo de elasticidad (MOE) =125384Kg/cm ²
Flexión	0.6g/cm ³	Resistencia en el límite proporcional (RPL) = 340Kg/cm ² Esfuerzo de carga máxima (MOR) = 624Kg/cm ² Módulo de elasticidad (MOE) =129806Kg/cm ²
Cizalladura	0.6g/cm ³	66Kg/cm ²

- **Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Bogotá.**

Tabla 14. Resistencia mecánica de la guadua: Pruebas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Bogotá.

Biotipo	Tracción				Compresión				Módulo de elasticidad	
	Esfuerzo de rotura (Kg/cm ²)				Esfuerzo de rotura (Kg/cm ²)				(Kg/cm ²)	
	Sin nudo		Con nudo		Sin nudo		Con nudo			
	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
Macana	970	1659	943	1429	606	689	525	660		
Castilla	1020	1560	548	1045					107000	173000

Nota: Para entender sobre los biotipos de la guadua refiérase al glosario.

- Instituto Alemán de Pruebas de Materiales de Construcción Civil, Stuttgart, para el pabellón de ZERI en noviembre de 1999.

Tabla 15. Resistencia mecánica de la guadua: Instituto Alemán de Prueba de Materiales de Construcción Civil, Stuttgart, para el pabellón de ZERI en noviembre de 1999. Construido con *Guadua angustifolia* (Biotipo macana).

Prueba	Peso específico	Resultados
Compresión	790kg/m ³	Sigma = 18N/mm ² Módulo de elasticidad (E) =18400N/mm ²
Flexión	790kg/m ³	Sigma = 18N/mm ² Módulo de elasticidad (E) =17900N/mm ²
Tracción	790kg/m ³	Sigma = 4>18N/mm ² Módulo de elasticidad (E) =19000N/mm ²
Cortante	790kg/m ³	Tau = 1,1N/mm ²

- Tim Martin Oberman (arquitecto) y Ronald Laude (Ing. Civil). *Bambú: Recurso sostenible para estructuras espaciales*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 2003/2004.

Tim Martin Oberman y Ronald Laude pertenecen a Bamboo Space que es un grupo que trabaja investigando y desarrollando nuevos sistemas constructivos en bambú. Ellos trabajan con los datos plasmados en la Tabla 16:

Tabla 16. Resistencia mecánica de la guadua: Compilación realizada por Bamboo Space de varios autores.

Año/Autor	Especificación	Compresión	Tracción	Flexión	Cortante	MOE
Martín, Mateus, Hidalgo 1981, Bogotá	ED 3-5 años DB 0.8 g/cm ³ CH ≤30%	6.29 σ _{max} 4.90 σ _{prom} 3.50 σ _{min} 2.80 σ _p	20.00 σ _{max} Fibra exterior 7.00 σ _{max} Fibra interior			1200 max 600 min

Año/Autor	Especificación	Compresión	Tracción	Flexión	Cortante	MOE
García, Martínez 1991, Quindío	ED 4-5 años DB 0.7 g/cm ³ CH ≤30% Macana	3.80 σ_{prom} 3.43 σ_{min} 1.35 σ_{adm}		3.00 σ_{prom} 1.75 σ_{min} 0.60 σ_{adm}	0.38 σ_{prom} 0.23 σ_{min} 0.11 σ_{adm}	300 prom 250 min
González, Días 1992, Medellín	DB 0.6 g/cm ³ Macana	3.43 σ_{max} 1.76 σ_{lp}		6.24 σ_{max} 3.40 σ_{lp}	0.66 σ_{min}	1250 max
Trujillo, & López L. F. 2000, Medellín	ED 3-5 años DB 0.7 g/cm ³ CH ≤30%	6.50 σ_{max} 4.38 σ_{prom} 2.80 σ_{min} 1.40 σ_{adm}	7.40 σ_{max} 5.40 σ_{prom} 3.50 σ_{min} 2.60 σ_{adm}	Calculado 1.50 σ_{adm}	0.80 σ_{max} 0.60 σ_{prom} 0.43 σ_{min} 0.11 σ_{adm}	1200 prom 600 min
FMPA, ZERI, Stuttgart 1999	$\lambda = 10$ $\lambda = 56$ $\lambda = 86$ Culmos enteros	5.60 σ_{prom} 3.90 σ_{prom} 2.70 σ_{prom}	9.00 σ_{prom} 1.80 σ_{lp}	7.40 σ_{prom} calculado	0.43 σ_{prom} 0.11 σ_{lp}	1800 prom
Resistencia mínima		3.00 σ_{min}	5.00 σ_{min}	3.00 σ_{min}	0.40 σ_{min}	600 min
Fuerzas admisibles		1.50 σ_{adm}	2.50 σ_{adm}	0.95 σ_{adm}	0.10 σ_{adm}	600 adm

Unidades en KN/cm²

ED: Edad / Tiempo de corte

DB: Densidad básica

CH: Contenido de humedad

E: MOE Modulo de elasticidad

σ_{max} : MOR Esfuerzo de Rotura máxima del ensayo

σ_{prom} : MOR Esfuerzo de Rotura promedio del ensayo

σ_{min} : MOR Esfuerzo de Rotura mínima del ensayo

σ_{lp} : RLP Límite de deformación proporcional

σ_{adm} : Esfuerzos admisibles por el autor del ensayo

ANEXO C
INFORMES DE ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS
(TERMINAL DE PLATINA SENCILLA)

1. Materiales
2. Información de cargas y restricciones
3. Propiedad del estudio
4. Resultados

1. Materiales

Nº	Nombre de pieza	Material	Masa	Volumen
1	Terminal de platina sencilla	AISI 1020	0.883447 kg	0.000111829 m ³

2. Información de cargas y restricciones

Restricción		
Restricción-1 <Terminal de platina sencilla>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 1 mm a lo largo de la cara Dir. 1. desplazamiento 1 mm a lo largo de la cara Dir. 2. desplazamiento 0 mm normal a la cara.	Carga secuencial
Descripción:		
Restricción-2 <Terminal de platina sencilla>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 0 mm normal a la cara.	Carga secuencial
Descripción:		
Restricción-3 <Terminal de platina sencilla>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 0 mm normal a la cara.	Carga secuencial

Carga		
Fuerza-1 <Terminal de platina sencilla>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza 10000 N normal a plano de referencia con respecto a la referencia seleccionada Dirección de fuerza utilizando distribución uniforme	Carga secuencial

3. Propiedad del estudio

Información de malla	
Tipo de malla:	Malla con elementos sólidos tetraédricos
Mallador utilizado:	Estándar
Transición automática:	Desactivar
Superficie suave:	Activar
Verificación jacobiana:	4 Points
Tamaño de elementos:	2.6506 mm
Tolerancia:	0.13253 mm
Calidad:	Alta
Número de elementos:	46834
Número de nodos:	74379
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:14
Nombre de computadora:	DESKTOP

Información del solver	
Calidad:	Alta
Tipo de solver:	Solver tipo FFEPlus
Opción:	Incluir efectos térmicos
Opción térmica:	Introducir temperatura
Opción térmica:	Temperatura de referencia a deformación unitaria cero: 298 Kelvin

4. Resultados

Resultados predeterminados

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	11422.6 N/m ² Nodo: 71865	(5.29167 mm, 1.3089 mm, 62.4863 mm)	1.09e+009 N/m ² Nodo: 68500	(-4.02455 mm, 33.5398 mm, 3.27107 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000990772 m Nodo: 621	(-58.7674 mm, -33.5 mm, -3.175 mm)	0.00141938 m Nodo: 65144	(6.35 mm, 20.3314 mm, - 0.932164 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	4.24197e- 008 Elemento: 19732	(5.05177 mm, 9.25416 mm, -61.2143 mm)	0.00366177 Elemento: 43197	(-4.20369 mm, 32.8564 mm, 2.85226 mm)

Nombre de modelo: Terminal de platina sencilla
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Geometría de referencia: Dirección de fuerza
Escala de deformación: 12.3665

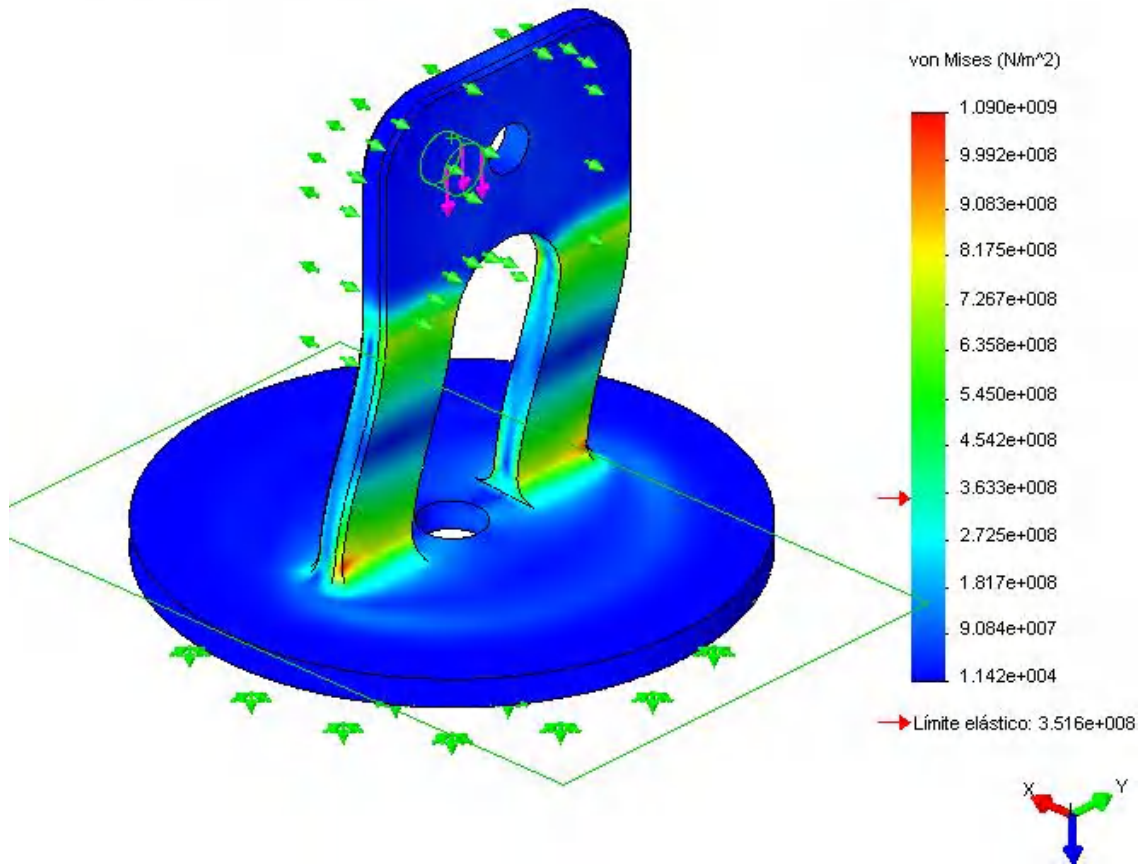


Figura C.1 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Tensiones-Tensiones1

Nombre de modelo: Terminal de platina sencilla
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 12.3665

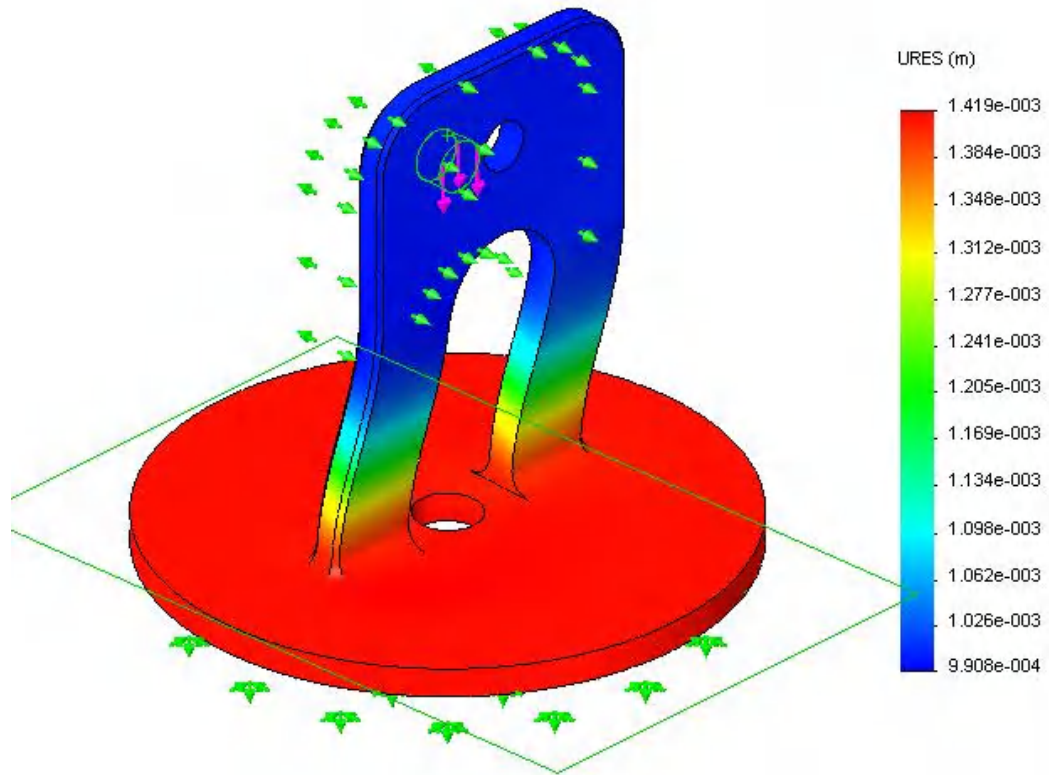
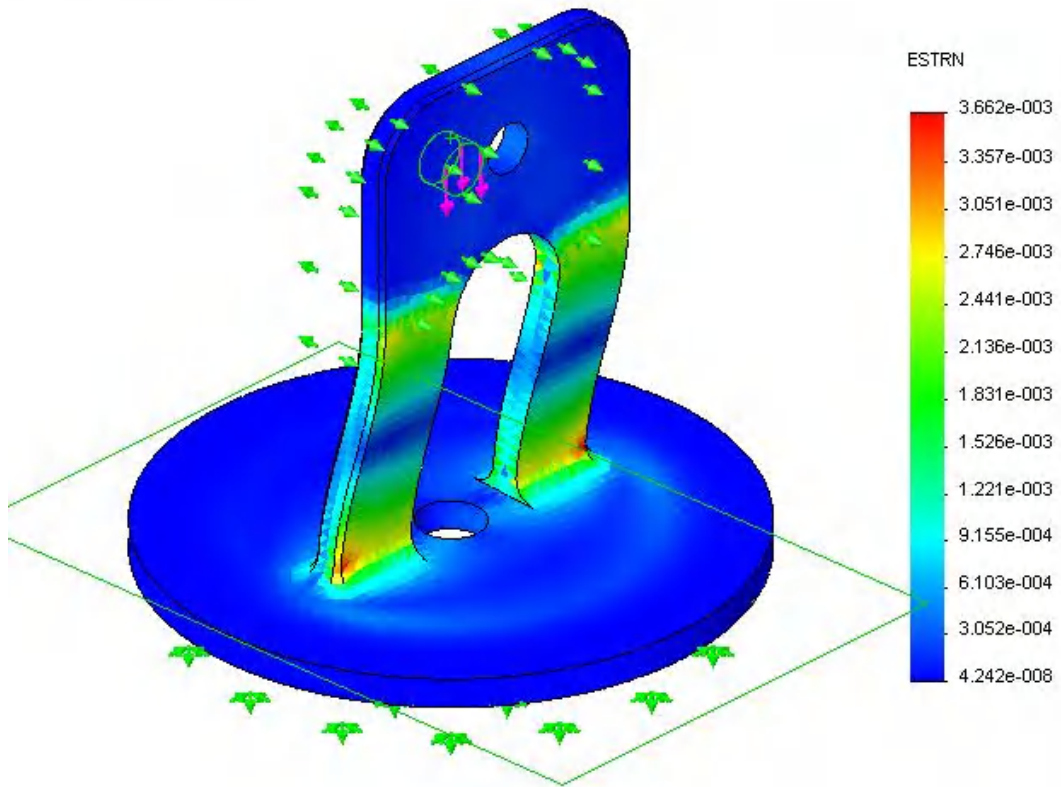


Figura C.2 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

Nombre de modelo: Terminal de platina sencilla
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 12.3665



**Figura C.3 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-
Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1**

Nombre de modelo: Terminal de platina sencilla
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Deformada Deformación4
Escala de deformación: 15

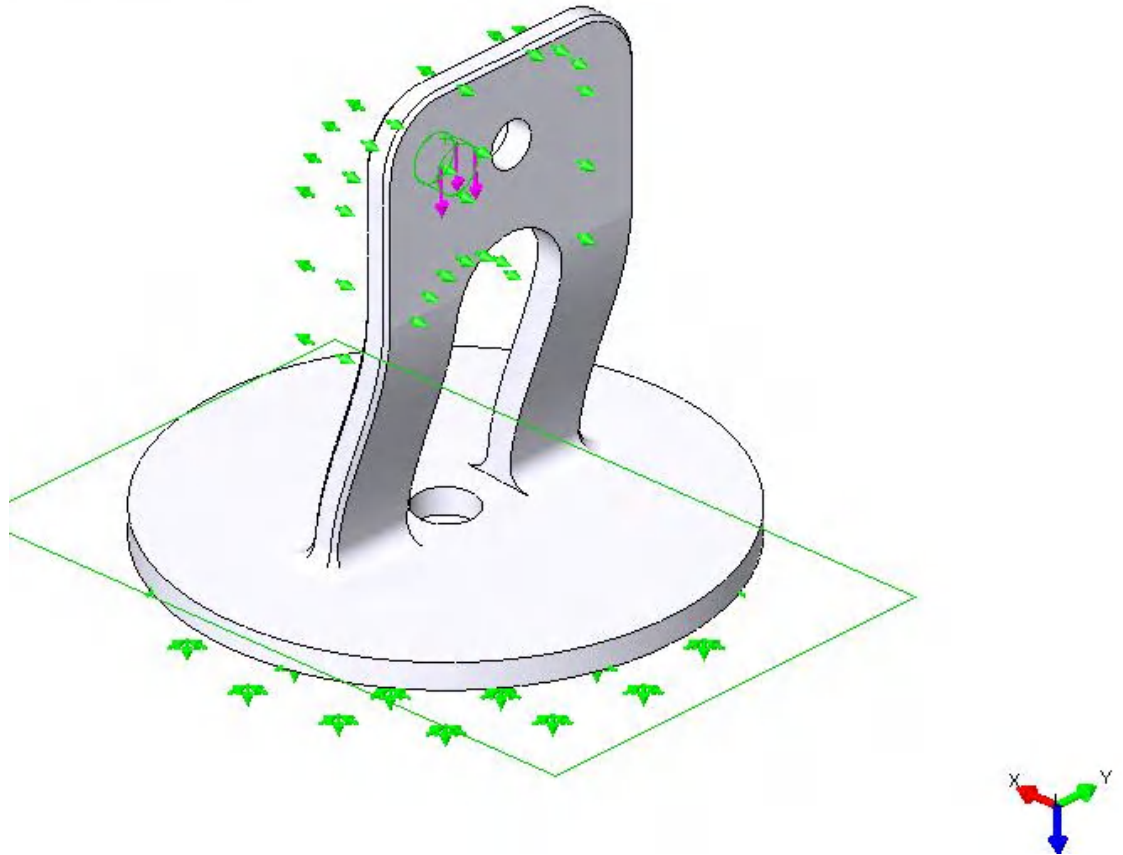


Figura C.4 Terminal de platina sencilla-Estudio 1-Deformación-Deformación4

ANEXO C
INFORMES DE ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS
(TERMINAL DE PLATINA REFORZADA)

1. Materiales
2. Información de cargas y restricciones
3. Propiedad del estudio
4. Resultados

1. Materiales

Nº	Nombre de pieza	Material	Masa	Volumen
1	Terminal de platina reforzada	AISI 1020	0.961797 kg	0.000121746 m ³

2. Información de cargas y restricciones

Restricción		
Restricción-1 <Terminal de platina reforzada>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 1 mm a lo largo de la cara Dir. 1. desplazamiento 1 mm a lo largo de la cara Dir. 2. desplazamiento 1 mm normal a la cara.	Carga secuencial
Descripción:		
Restricción-2 <Terminal de platina reforzada>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 0 mm normal a la cara.	Carga secuencial
Descripción:		
Restricción-3 <Terminal de platina reforzada>	activar 1 Cara(s) con desplazamiento 0 mm normal a la cara.	Carga secuencial

Carga		
Fuerza-1 <Terminal de platina reforzada>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza 10000 N normal a plano de referencia con respecto a la referencia seleccionada Dirección de fuerza utilizando distribución uniforme	Carga secuencial

3. Propiedad del estudio

Información de malla	
Tipo de malla:	Malla con elementos sólidos tetraédricos
Mallador utilizado:	Estándar
Transición automática:	Desactivar
Superficie suave:	Activar
Verificación jacobiana:	4 Points
Tamaño de elementos:	3.6563 mm
Tolerancia:	0.18282 mm
Calidad:	Alta
Número de elementos:	19611
Número de nodos:	33256
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	DESKTOP

Información del solver	
Calidad:	Alta
Tipo de solver:	Solver tipo FFEPlus
Opción:	Incluir efectos térmicos
Opción térmica:	Introducir temperatura
Opción térmica:	Temperatura de referencia a deformación unitaria cero: 298 Kelvin

4. Resultados

Resultados predeterminados

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	96865.2 N/m ² Nodo: 32020	(4.7625 mm, 10.853 mm, -61.5505 mm)	2.29899e+009 N/m ² Nodo: 12431	(-2.90219 mm, 27.6364 mm, 22.7021 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.00116404 m Nodo: 1508	(-104.352 mm, 31.2275 mm, 2.175 mm)	0.00178948 m Nodo: 1805	(6.35 mm, -14.937 mm, 3.6995 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.89988e- 007 Elemento: 15019	(4.9608 mm, 9.52509 mm, -61.1863 mm)	0.00698824 Elemento: 7321	(-2.40058 mm, 26.1257 mm, 22.4439 mm)

Nombre de modelo: Terminal de platina reforzada
Nombre de estudio: Estudio 2
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 10.2207

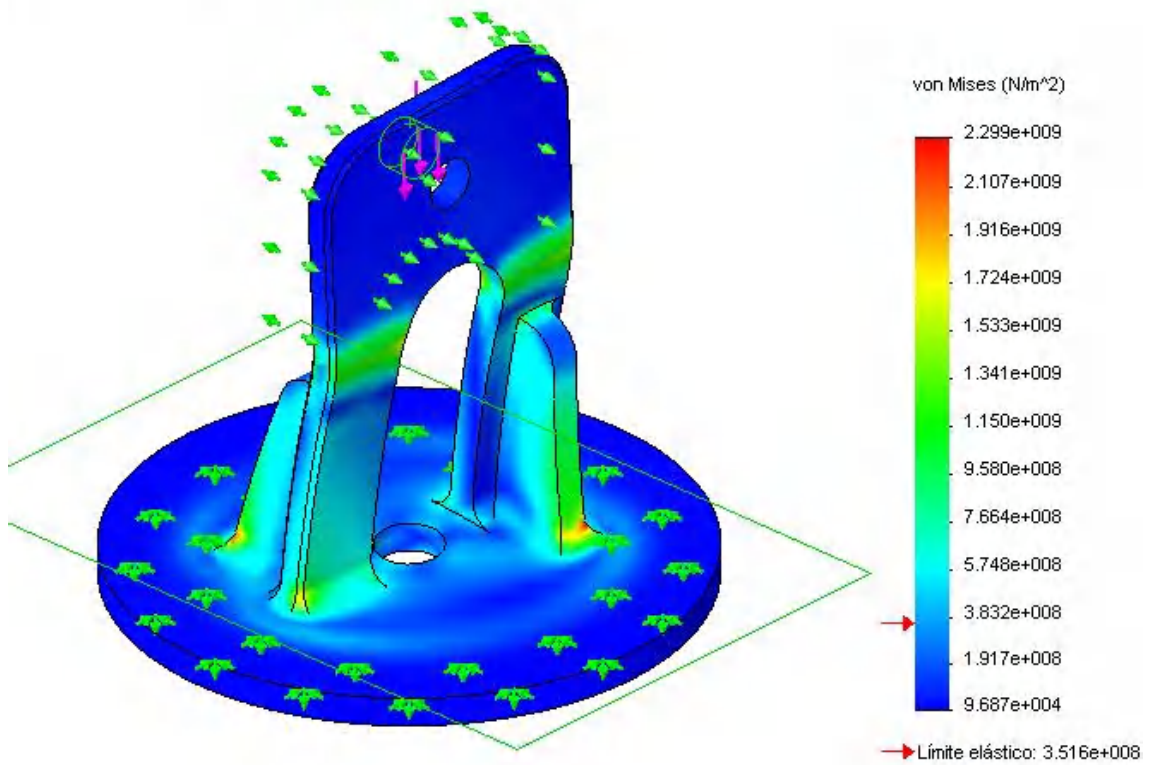


Figura C.5 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Tensiones-Tensiones1

Nombre de modelo: Terminal de platina reforzada
Nombre de estudio: Estudio 2
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 10.2207

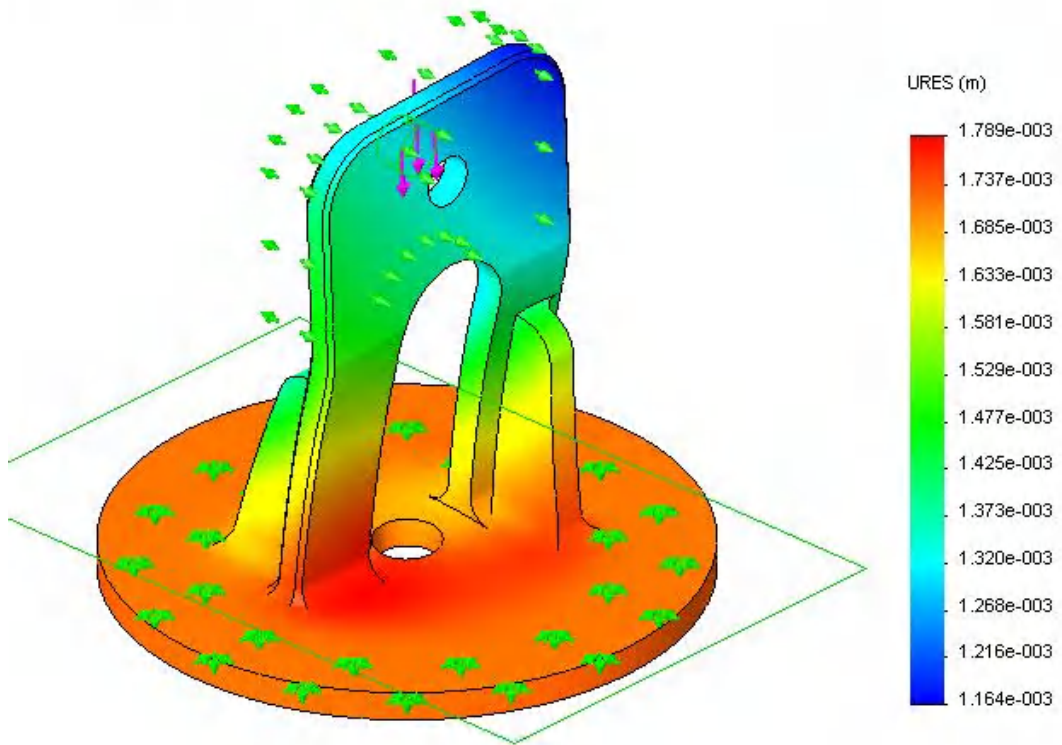
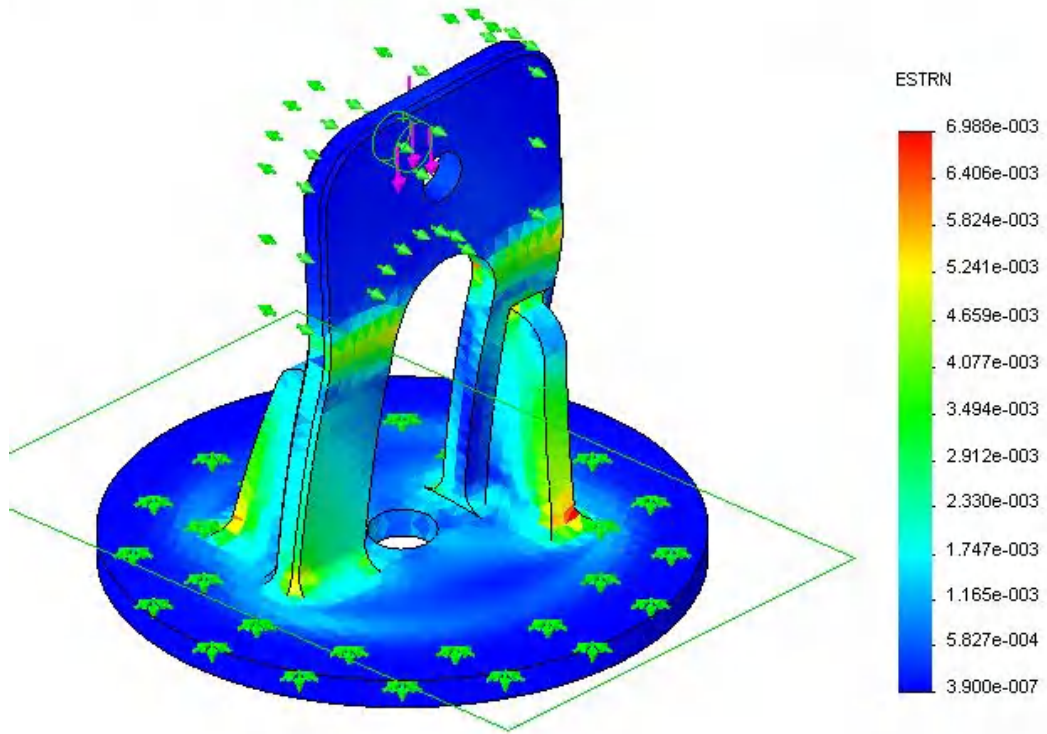


Figura C.6 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Desplazamientos-Desplazamientos1

Nombre de modelo: Terminal de platina reforzada
Nombre de estudio: Estudio 2
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 10.2207



**Figura C.7 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-
Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1**

Nombre de modelo: Terminal de platina reforzada
Nombre de estudio: Estudio 2
Tipo de resultado: Deformada Deformación2
Escala de deformación: 15

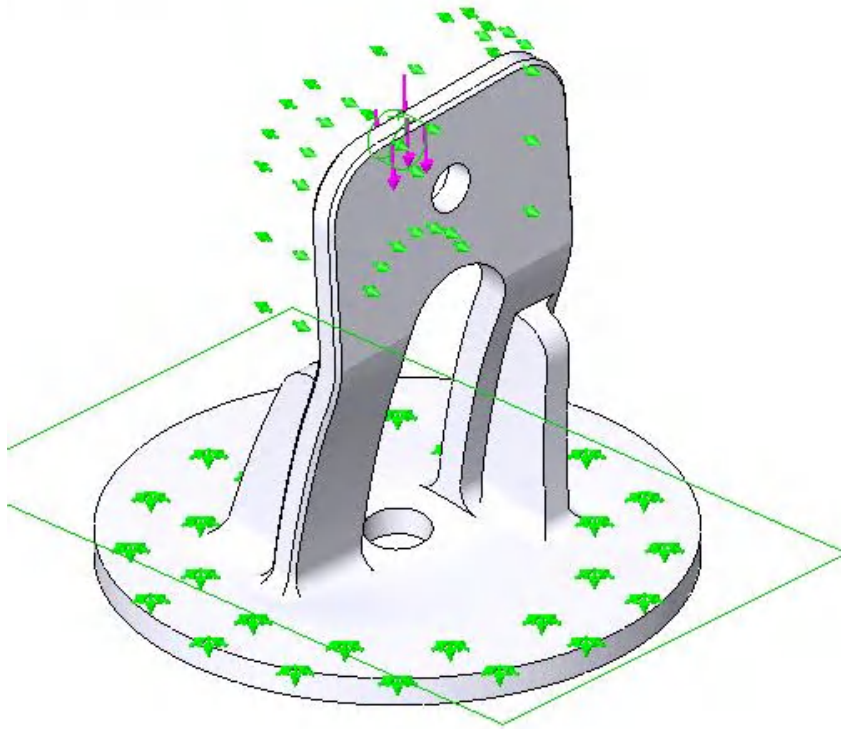


Figura C.8 Terminal de platina reforzada-Estudio 2-Deformación-Deformación2

ANEXO E

CÁLCULO DE ELEMENTOS A COMPRESIÓN CONSIDERANDO EL PANDEO

A continuación se expondrán los resultados de los cálculos de elementos a compresión considerando el pandeo y las respectivas fórmulas utilizadas.

Tabla 17. Fuerzas admisibles a compresión en guaduas individuales

Variable	Largo de las guaduas					
	3m		2,5m		2m	
Diámetro exterior (mm)	100	120	100	120	100	120
Diámetro interior (mm)	76	96	76	96	76	96
Área (mm²)	3317,5	4071,5	3317,5	4071,5	3317,5	4071,5
Inercia (mm⁴)	3271076,5	6009540,0	3271076,5	6009540,0	3271076,5	6009540,0
Radio de giro	31,4	38,4	31,4	38,4	31,4	38,4
Longitud efectiva (mm)	3000	3000	2500	2500	2000	2000
Esbeltez (λ)	95,5	78,1	79,6	65,1	63,7	52,1
Módulo de elasticidad admisible (MPa)	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Esfuerzo admisible a compresión (MPa)	15	15	15	15	15	15
Constante C_k	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8
Tipo de columna	Larga	Larga	Larga	Larga	Larga	Intermedia
Carga crítica de Euler (N)	26903,5	49426,5	38741,1	71174,1	60532,9	111209,6
Parábola de Johnson (N)	26751,5	42206,9	33782,8	47971,4	39535,6	52687,8
Carga admisible (Ton)	2,69	4,94	3,38	4,80	3,95	5,27

Columnas cortas: $\lambda < 30$
 Columnas intermedias: $30 < \lambda < C_k$
 Columnas largas: $C_k < \lambda < 150$
 $\lambda > 150$ inaceptable

La tabla anterior presenta el cálculo de tres largos diferentes de guaduas y para cada uno toma dos medidas de diámetro comercial comúnmente utilizados (de 10 y 12 centímetros de diámetro exterior y un espesor de pared de 12 milímetros en todos los casos).

Tabla 18. Fuerzas admisibles a compresión en columnas compuestas por 6 guaduas separadas a 180mm del centro

Variable	Largo de las Columnas compuestas					
	5m		6m		7m	
Diámetro exterior (mm)	100	120	100	120	100	120
Diámetro interior (mm)	76	96	76	96	76	96
Área por guadua (mm ²)	3317,5	4071,5	3317,5	4071,5	3317,5	4071,5
Área total (mm ²)	19905,1	24429,0	19905,1	24429,0	19905,1	24429,0
Inercia por guadua (mm ⁴)	3271076,5	6009540,0	3271076,5	6009540,0	3271076,5	6009540,0
Inercia total (mm ⁴)	342089582	431807437	342089582	431807437	342089582	431807437
Radio de giro	131,1	133,0	131,1	133,0	131,1	133,0
Longitud efectiva (mm)	5000	5000	6000	6000	7000	7000
Esbeltez (λ)	38,1	37,6	45,8	45,1	53,4	52,7
Módulo de elasticidad admisible (MPa)	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Esfuerzo admisible a compresión (MPa)	15	15	15	15	15	15
Constante C _k	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8
Tipo de columna	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia
Parábola de Johnson (N)	276573,5	340179,7	266891,9	328627,2	255450,1	314974,2
Carga admisible (Ton)	27,66	34,02	26,69	32,86	25,55	31,50

Columnas cortas: $\lambda < 30$

Columnas intermedias: $30 < \lambda < C_k$

Columnas largas: $C_k < \lambda < 150$

$\lambda > 150$ inaceptable

FÓRMULAS USADAS:

- **Área de la sección tubular de la guadua:**

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

- **Inercia de la sección tubular de la guadua:**

$$I = \frac{\pi}{64} * (d_e^4 - d_i^4)$$

La inercia total de las columnas compuestas por seis guadas fue calculada mediante el software CAD SolidWorks con la herramienta de propiedades de sección.

- **Radio de giro de la sección:**

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

- **Longitud efectiva:**

$$l_{ef} = L * k$$

La longitud L y la longitud efectiva l_{ef} resultaron siendo los mismos pues se tomo a la constante $k = 1$. La constante k es la que brinda la condición de los apoyos de la columna así:

Tabla 19. Valores de la constante k según la condición de apoyo de la columna

Condiciones de los apoyos	Teórico	Conservador (Shigley)	Recomendado (Shigley)
Empotrado - Libre	0,25	0,25	0,25
Pasador - Pasador	1	1	1
Empotrado - Pasador	2	1	1,2
Empotrado - Empotrado	4	1	1,2

- **Esbeltez de la columna:**

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}$$

- **Constante C_k :**

$$C_k = 2.72 * \sqrt{\frac{E}{\sigma_{adm}}}$$

- **Carga crítica de Euler:**

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_{ef}^2}$$

La Carga crítica de Euler fue utilizada para columnas largas pues para las intermedias y cortas la ecuación del pandeo de Euler no brinda unos datos reales.

- **Parábola de Johnson:**

$$P_{cr} = \sigma_{adm} - \frac{1}{E} * \left(\frac{\sigma_{adm} * l_{ef}}{2\pi * i} \right)^2 * A$$

La parábola de Johnson fue utilizada para columnas intermedias pues brinda unos datos más reales que la de Euler para estos elementos.

Nota: Las abreviaturas empleadas se presentan en la sección preliminar del trabajo.

CONTACTO

Daniel Palacios López
Correo: pala420@hotmail.com
Celular: 300-7784404