

**PROPUESTA DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO BASE LAMINADO DE  
GUADUA**

**SERGIO ANTONIO BUENO CARREÑO  
LUIS EDUARDO RODRÍGUEZ GALÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

**PROPUESTA DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO BASE LAMINADO DE  
GUADUA**

**SERGIO ANTONIO BUENO CARREÑO  
LUIS EDUARDO RODRÍGUEZ GALÁN**

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

**Director  
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ  
Ingeniero Civil, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

*A Dios.*

*A mis padres, Custodia y Vicente por su  
apoyo incondicional.*

*A mis Hermanos.*

*Con todo mi amor.*

*Sergio Antonio*

“  
*a Dios y a la Virgen*  
*a mis Padres*  
*a mi Hermana Patricia*  
*mi hermano y hermanas*  
”

“*No tengo palabras para decirles cuanto les quiero y les agradezco, por eso*  
*simplemente soy como soy*”

*Lalo*

## **AGRADECIMIENTOS**

El grupo de investigación hace un pequeño reconocimiento plasmando en este escrito los nombres de aquellas personas que de alguna forma aportaron su ayuda sin esperar nada a cambio.

Director del proyecto, Ing. Ricardo Cruz.

Profesor Arq. Julio Pinillos.

Jörg Stamm Experto en Construcción con Guadua.

Mauricio, encargado de los talleres de Diseño Industrial.

Javier y William, Auxiliares de Laboratorio de Resistencia de Materiales.

Jorge Heli Rodríguez.

Jorge Mauricio Rodríguez.

Ing. Jorge Alberto Guzmán.

Arq. Janer Rodríguez

Ing. Guillermo Mejía.

Arq. Pilar Castro.

Luis Carlos Calderón.

Diana María Ardila.

Yesid Carreño.

Lina Vanesa Barbosa.

Carlos Rivas.

Bernardo Barbosa.

## TABLA DE CONTENIDO

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN.....                                     | 1           |
| 1. MARCO TEÓRICO.....                                 | 3           |
| 1.1 GENERALIDADES SOBRE LA GUADUA.....                | 3           |
| 1.1.1 Descripción.....                                | 3           |
| 1.1.2 Forma de Propagación.....                       | 4           |
| 1.1.3 Bondades de La Guadua.....                      | 4           |
| 1.2 MADERA LAMINADA ESTRUCTURAL.....                  | 6           |
| 1.2.1 Definición.....                                 | 6           |
| 1.2.2 Reseña Histórica.....                           | 7           |
| 1.2.3 Componentes.....                                | 8           |
| 1.2.4 Propiedades.....                                | 12          |
| 1.2.5 Ventajas de la Madera Laminada Estructural..... | 17          |
| 2. CARACTERIZACION DEL LAMINADO DE GUADUA.....        | 20          |
| 2.1 GENERALIDADES.....                                | 20          |
| 2.2 SELECCIÓN DEL ADHESIVO.....                       | 21          |
| 2.3 PROPIEDADES FISICAS DE LA GUADUA.....             | 25          |
| 2.3.1 Humedad.....                                    | 25          |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.2 Densidad.....   | 26 |
| 2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LAMINADO.....                           | 27 |
| 2.4.1 Ensayo De Compresión.....                                       | 27 |
| 2.4.2 Ensayo De Tracción.....   | 28 |
| 2.4.3 Ensayo De Flexión.....  | 29 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS.....                          | 31 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ADHESIVO.....                                 | 31 |
| 3.1.1 Ensayo de Cortante en Adhesivos.....                            | 31 |
| 3.1.2 Ensayo De Tracción En Adhesivos.....                            | 33 |
| 3.2 PROPIEDADES FÍSICAS.....  | 35 |
| 3.2.1 Humedad.....  | 35 |
| 3.2.2 Densidad.....   | 37 |
| 3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.....  | 39 |
| 3.3.1 Ensayo De Compresión.....                                       | 39 |
| 3.3.2 Ensayo de Tracción.....   | 47 |
| 3.3.3 Ensayo de Flexión.....  | 49 |
| 3.4 COMPARACIÓN MECÁNICA DEL LAMINADO CON MADERAS<br>COMERCIALES..... | 54 |
| 4. PROPUESTA DE ELEMENTO.....   | 56 |
| 4.1 COLUMNA.....  | 56 |
| 4.1.1 Características del Ensayo y del Espécimen.....                 | 56 |
| 4.1.2 Descripción de las Fallas.....                                  | 58 |
| 4.1.3 Resultados.....   | 61 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.1.4 | Análisis de los Resultados.....                    | 62 |
| 4.2   | VIGA.....  | 63 |
| 4.2.1 | Características del Ensayo y del Espécimen.....    | 63 |
| 4.2.2 | Descripción de las Fallas.....                     | 65 |
| 4.2.3 | Resultados.....                                    | 70 |
| 4.2.4 | Análisis de los Resultados.....                    | 71 |
| 4.3   | DISEÑO PARA ELEMENTOS BASE LAMINADO DE GUADUA..... | 72 |
| 4.3.1 | Elementos Sometidos a Compresión.....              | 72 |
| 4.3.2 | Elementos Sometidos a Flexión.....                 | 73 |
| 4.4   | ANÁLISIS DE COSTOS.....                            | 73 |
| 5.    | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                | 76 |
| 5.1   | CONCLUSIONES.....                                  | 76 |
| 5.2   | RECOMENDACIONES.....                               | 77 |
|       | BIBLIOGRAFÍA.....                                  | 78 |
|       | ANEXOS.....  | 79 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Tipos de Empalmes Longitudinales.....              | 11          |
| Figura 2. Interfase de Superficies Rugosas.....              | 14          |
| Figura 3. Tipos de Compresión en la Madera.....              | 15          |
| Figura 4. Flexión en Vigas.....                              | 16          |
| Figura 5. Cortante Longitudinal.....                         | 17          |
| Figura 6. Probeta para Medir Cortante en Adhesivo.....       | 23          |
| Figura 7. Probeta para Medición de Contenido de Humedad..... | 26          |
| Figura 8. Probetas Tipo de Compresión.....                   | 27          |
| Figura 9. Probeta de Tracción.....                           | 29          |
| Figura 10. Probetas Tipo de Flexión.....                     | 30          |
| Figura 11. Configuración de Sección Columna.....             | 57          |
| Figura 12. Sección LB1.....                                  | 64          |
| Figura 13. Sección LB2.....                                  | 64          |

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

|  | <b>pág.</b> |
|--|-------------|
| Fotografía 1. Guadual.....                             | 3           |
| Fotografía 2. Suelo protegido por Guadual.....         | 5           |
| Fotografía 3. Coliseo con cubierta en MLE.....         | 8           |
| Fotografía 4. Ensayo de Cortante para Adhesivo.....    | 24          |
| Fotografía 5. Ensayo de Tracción para Adhesivo.....    | 25          |
| Fotografía 6. Ensayo de Compresión de Laminado.....    | 28          |
| Fotografía 7. Probetas de Tracción modificada. ....    | 29          |
| Fotografía 8. Ensayo de Flexión.....                   | 29          |
| Fotografía 9. Falla por Cortante en Adhesivo.....      | 33          |
| Fotografía 10. Falla por Tracción en Adhesivo.....     | 33          |
| Fotografía 11. Falla Tipo en Compresión Paralela.....  | 42          |
| Fotografía 12. Falla de Adhesivo en PCPP.....          | 44          |
| Fotografía 13. Falla de Guadua en PCPP.....            | 44          |
| Fotografía 14. Falla por Aplastamiento.....            | 47          |
| Fotografía 15. Falla por tracción.....                 | 48          |
| Fotografía 16. Falla en Flexión Laminado Vertical..... | 50          |
| Fotografía 17. Falla a Cortante en PFH.....            | 52          |
| Fotografía 18. Falla en la Guadua en PFH.....          | 52          |
| Fotografía 19. Columnas del Ensayo.....                | 57          |
| Fotografía 20. Columna 1 Fallada.....                  | 58          |
| Fotografía 21. Columna 2 Fallada.....                  | 59          |
| Fotografía 22. Columna 3 Fallada.....                  | 59          |
| Fotografía 23. Columna 4 Fallada.....                  | 60          |
| Fotografía 24. Columna 5 Fallada.....                  | 60          |

|   |    |
|---|----|
| Fotografía 25. Viga Cargada en el Centro de la Luz..... | 65 |
| Fotografía 26. Vigas a Ensayar.....                     | 65 |
| Fotografía 27. Deslizamiento Módulo Inferior.....       | 66 |
| Fotografía 28. Viga 1 fallada.....                      | 66 |
| Fotografía 29. Viga 2 fallada.....                      | 67 |
| Fotografía 30. Viga 3 fallada.....                      | 68 |
| Fotografía 31. Viga 4 fallada.....                      | 69 |

## LISTA DE TABLAS

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla1. Esfuerzos cortantes en adhesivos.....                               | 31          |
| Tabla 2. Esfuerzos de tracción en adhesivos. ....                           | 34          |
| Tabla 3. Contenido de humedad PCH.....                                      | 36          |
| Tabla4. Contenido de humedad CHN.....                                       | 37          |
| Tabla 5. Densidades PCH.....  | 38          |
| Tabla 6. Densidades CHN.....  | 39          |
| Tabla 7. Esfuerzos y Deformaciones Máximas a Compresión Paralela .....      | 40          |
| Tabla 8. Datos de sc, ?unt. PCPP.....                                       | 42          |
| Tabla 9. Datos de sc, ?unt. PCPA.....                                       | 46          |
| Tabla 10. Esfuerzo Último y Deformación Unitaria a Compresión.....          | 47          |
| Tabla 11. Valores de Esfuerzo para Tracción.....                            | 47          |
| Tabla 12. Esfuerzo a Tracción para láminas de guadua.....                   | 49          |
| Tabla 13. Valores para Flexión en PFV.....                                  | 49          |
| Tabla 14. Valores para Flexión en PFH.....                                  | 52          |
| Tabla 15. Esfuerzos últimos y Módulos de Elasticidad para Flexión.....      | 54          |
| Tabla 16. Cuadro comparativo de esfuerzos últimos para varias especies..... | 54          |
| Tabla 17. Resultados Ensayos para las Columnas.....                         | 61          |
| Tabla 18. Resultados Ensayos para las Vigas.....                            | 70          |
| Tabla 19. Precio de Flete.....  | 74          |
| Tabla 20. Precio de Vigas de Madera en el Mercado Local.....                | 75          |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1. Esfuerzos cortantes promedio en adhesivos.....                                   | 32   |
| Gráfica 2. Dispersión de esfuerzos de Tracción en adhesivos.....                            | 35   |
| Gráfica 3. Dispersión Contenido de Humedad PCH.....   | 36   |
| Gráfica 4. Dispersión Contenido de Humedad CHN.....   | 37   |
| Gráfica 5. Dispersión de densidades PCH.....  | 38   |
| Gráfica 6. Dispersión de densidades CHN.....  | 39   |
| Gráfica 7. Esfuerzos máximos en Compresión Paralela.....                                    | 40   |
| Gráfica 8. Módulos de Elasticidad máximos en Compresión Paralela.....                       | 41   |
| Gráfica 9. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Paralela.....                            | 41   |
| Gráfica 10. Dispersión de Esfuerzos.....  | 43   |
| Gráfica 11. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Perpendicular.....                      | 43   |
| Gráfica 12. Comportamiento de las probetas PCPA con sobre carga.....                        | 45   |
| Gráfica 13. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Perpendicular por<br>Aplastamiento..... | 45   |
| Gráfica 14. Esfuerzos máximos en PCPA.....  | 46   |
| Gráfica 15. Dispersión de Esfuerzos para Tracción.....                                      | 48   |
| Gráfica 16. Dispersión Módulos de Rotura en PFV.....  | 50   |
| Gráfica 17. Dispersión Módulos de Elasticidad en PFV.....                                   | 51   |
| Gráfica 18. Carga vs Deflexión para Flexión con láminas verticales.....                     | 51   |
| Gráfica 19. Dispersión Módulos de Rotura en PFH.....  | 53   |
| Gráfica 20. Dispersión Módulo Elástico en PFH.....  | 53   |
| Gráfica 21. Carga vs Deflexión para Flexión con láminas horizontales.....                   | 54   |
| Gráfica 22. Esfuerzo vs Deformación para las Columnas.....                                  | 61   |
| Gráfica 23. Carga vs Deflexión para las Vigas.....  | 70   |

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. Máquinas de Laboratorio

ANEXO B. Control de Variación de Humedad

ANEXO C. Geometría y Dimensiones de las Probetas

ANEXO D. Tablas de Resultados de Ensayos

ANEXO E. Esfuerzos y Deformaciones en Propuesta de Elementos.

ANEXO F. Descripción del Proceso de Laminado

ANEXO G. Cálculo de Empalmes Longitudinales.

## RESUMEN

### TITULO

PROPUESTA DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO BASE LAMINADO DE GUADUA \*

### AUTORES

BUENO CARREÑO, Sergio Antonio  
RODRÍGUEZ GALÁN, Luis Eduardo \*\*

### PALABRAS CLAVES

Laminados, Madera, Guadua, Adhesivos, Resistencia, Módulo de Elasticidad.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de esta investigación es presentar una propuesta de elementos constructivos estructurales elaborados con Laminado de Guadua (*Angustifolia Kunt*), analizando su comportamiento mecánico y un costo comercial aproximado.

La metodología utilizada consistió en la caracterización del laminado de guadua; inicialmente se seleccionó el adhesivo a utilizar teniendo en cuenta la resistencia mecánica a esfuerzos de corte y tracción; se somete posteriormente el compuesto del laminado a ensayos de compresión, tracción y flexión, utilizando para cada sollicitación una muestra de 10 probetas de las cuales se calcularon esfuerzos últimos promedios. Se compararon las propiedades mecánicas obtenidas contra ocho especies de maderas típicas de la región de Santander. Se propuso un elemento columna y un elemento viga basado en la caracterización del compuesto, planteando configuraciones para las secciones rectas de los elementos, clasificando tres tipos de especímenes, uno para columnas y dos para vigas, resumiendo en tablas los esfuerzos obtenidos para cada sollicitación de carga y analizando el tipo de fallas presentadas en los especímenes. Se plantea un diseño tipo para los elementos columna y viga basado en la Norma Sismorresistente (NSR-98). Se cuantifica de forma aproximada el costo comercial del elemento en Bucaramanga y se compara con el costo del Sapan y el Maqui.

Finalmente se concluye que la utilización del laminado de guadua es viable mecánica y económicamente convirtiéndose en una buena alternativa para la construcción. Se recomienda un estudio más detallado en variables importantes en los elementos, como el diseño de la ubicación de la zona de empalmes y de tipos de juntas más eficientes.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Ingeniería Civil. Ricardo Alfredo Cruz Hernández

## ABSTRACT

### TITLE

PROPOSAL OF CONSTRUCTIVE ELEMENT WITH LAMINATED OF GUADUA \*

### AUTHORS

BUENO CARREÑO, Sergio Antonio  
RODRÍGUEZ GALÁN, Luis Eduardo \*\*

### KEY WORDS

Laminates, Wood, Guadua, Adhesives, Resistance, Modulus of elasticity.

### DESCRIPTION

The objective of this investigation is to present a proposal of elaborated structural constructive elements with Laminate of Guadua

It consisted of the characterization of the laminate of guadua; initially one selected to the adhesive considering the mechanical resistance to cut efforts and traction; tests of compression, traction and flexion to the compound are applied, using for each requesting a sample of 10 test tubes of which last averages calculated efforts. The obtained mechanical properties against eight typical wood species of the region of Santander were compared. An element seted out column and an element beam based on the characterization of the compound, using configurations for the straight sections of the elements, after trying the samples is done a summary in tables of the efforts obtained for each requesting of load and analyzing the type of faults presented in the elements. A design considers type for the elements column and beam based on Norma Sismorresistente (NSR-98). The commercial cost of the element is quantified of approximate form.

Finally one concludes that the use of the laminate of guadua is viable mechanics and economically becoming a good alternative for the construction. A study detailed in important variables in the elements is recommended more, as the design of the location of the zone of joints and types of more efficient meetings.

---

\* Degree Project

\*\* Physics-Mechanics Engineering Faculty, Civil Engineering School, Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

## NOMENCLATURA

MLE: Madera Laminada Estructural

PVA: Poliacetato de Vinilo

d: Densidad en  $\text{gr}/\text{cm}^3$

m: Masa en gr.

v: Volumen en  $\text{cm}^3$

CH: Contenido de Humedad en %.

Pi: Peso Inicial en gr.

Ps: peso seco al Horno en gr.

C: Contracción en %

Dv: Dimensión verde en cm.

Dsf: Dimensión seca final en cm.

$s_c$ : Esfuerzo a compresión

P: Carga en KN

A: Área en  $\text{cm}^2$

$s_T$ : Esfuerzo a tracción

$s_B$ : Esfuerzo a flexión

Y: Distancia del eje neutro a la fibra en cm.

T: Esfuerzo a cortante

V: Cortante en KN

Q: Primer momento de inercia en  $\text{cm}^3$

t: Espesor en cm.

PVAC1: Probeta de cortante para PVA1

PVAC2: Probeta de cortante para PVA2

PCC: Probeta de cortante para Cola

PTC: Probeta de tracción para Cola

PCH: Probetas de contenido de humedad sin nudo

CHN: Probetas de contenido de humedad con nudo

$D_s$ : Densidad seca al aire  $\text{kg/cm}^3$ .

$D_a$ : Densidad anhidra  $\text{kg/cm}^3$

PCP: Probetas de compresión paralela

PCPP: Probetas de compresión perpendicular

PCPA: Probetas de compresión perpendicular por aplastamiento

PTP: Probetas de tracción paralela

PFV: Probetas de flexión para laminado orientado verticalmente

PFH: Probetas de flexión para laminado orientado horizontalmente

$s_{Bult}$ : Esfuerzo último a flexión en  $\text{kg/cm}^2$

L: Luz entre apoyos en cm

b: Base de la sección recta en cm

h: Altura en cm

?: Flecha máxima en cm

$P_{lp}$ : Carga en límite de proporcionalidad

$\epsilon_{unit}$ : Deformación unitaria

ICCV: Índices de costos de la construcción de vivienda

IPC : Índices de costos al consumidor.

## INTRODUCCION

“El mundo camina a pasos agigantados, obligando a un constante desarrollo de las tecnologías”

Las construcciones en madera han hecho parte de la cotidianidad del hombre en el transcurso de la historia, sin embargo esta siendo relegada a segundo plano. El laminado de madera se presenta como una alternativa, mostrando la posibilidad de ajustar la madera a los tamaños y formas en las que le sean requeridas, dando solución a las desventajas mostradas por la madera con respecto a otros materiales.

El laminado de guadua es una tecnología relativamente nueva en la industria colombiana, sin embargo su aplicación hasta el momento se ha basado en elementos de decoración, tableros y pisos. La propuesta del laminado de guadua para uso estructural nace como una opción de presentar un elemento con menor impacto ambiental, disminuyendo el uso indiscriminado de los bosques tropicales, además su industrialización generaría ingresos a la economía colombiana.

Esta investigación busca proponer un elemento constructivo elaborado a base de laminados de guadua, haciendo un estudio general del comportamiento físico-mecánico incluyendo un breve estudio económico suficiente para hacer un análisis beneficio/costo y compararlo con otras maderas.

La presente investigación se desarrolla en cinco capítulos de la siguiente forma:

El primer capítulo lleva por nombre MARCO TEÓRICO, en el se proporciona los conceptos básicos necesarios para el desarrollo de la investigación. Inicialmente

se da a conocer las generalidades de la guadua, sus características y bondades. Más adelante se presenta todo lo relacionado con la madera laminada estructural, iniciando con una reseña histórica, hablando de los componentes básicos del laminado y las propiedades a tener en cuenta para la caracterización de dichos componentes.

En el segundo capítulo llamado CARACTERIZACIÓN DEL LAMINADO DE GUADUA se describe el proceso llevado a cabo para la selección de las variables a evaluar, compra de la materia prima y la gestión de la herramienta y maquinaria necesaria para el proyecto. También se presenta la metodología para la caracterización de la materia prima Guadua, del adhesivo y del laminado, estableciendo los ensayos utilizados para tal fin.

El tercer capítulo llamado RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS presenta como su nombre lo dice todos los resultados obtenidos de los ensayos propuestos en el capítulo dos. Finalmente se hace la comparación mecánica de los datos obtenido para el laminado de guadua con algunas especies de madera.

En el capítulo cuarto que lleva por nombre PROPUESTA DE ELEMENTO se compila los resultados y análisis del capítulo tres para proponer dos elementos constructivos. En el capítulo se plantea la configuración, ensayo de los elementos, analizando los resultados obtenidos. Finalmente se presenta una metodología para el diseño de elementos de laminado de guadua y un análisis económico del laminado estructural.

En el capítulo cinco CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se presenta las conclusiones finales de la investigación, haciéndose recomendaciones para el diseño de los elementos constructivos de laminado de guadua

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 GENERALIDADES SOBRE LA GUADUA

**1.1.1 Descripción** La guadua, considerada pasto gigante, es un bambú espinoso, de porte arbustivo o arbóreo, de la familia de las gramíneas como el arroz, la caña de azúcar, el trigo y demás cereales. Esta especie crece naturalmente en Colombia, Ecuador y Venezuela, también ha sido introducida en Centro América, Islas del Caribe, Hawai y Asia. En 1820, el botánico alemán Carl Sigismud Kunt clasifica este género del bambú con el vocablo “guadúa”, nombre que los indígenas le tenían. Existen aproximadamente 30 especies de guadua, sin embargo la guadua angustifolia (especie objetivo de éste estudio) presenta unas características físico-mecánicas que la hacen sobresalir. La guadua angustifolia alcanza hasta 30m de altura y su tallo o culmo posee un diámetro hasta de 25 cm.

Fotografía 1. Guadua



La relación densidad-resistencia es alta, al igual que su capacidad de absorber energía, convirtiéndola en una buena opción para la construcción sismorresistente.

Estas características la hacen un material versátil, clasificándola como una de las 20 mejores especies de bambú a nivel mundial.

**1.1.2 Forma de Propagación** La guadua puede reproducirse por medio de:

- *Reproducción sexual o por semilla:* La reproducción sexual se da cuando germina una semilla (espiga) que ha sido esparcida ya sea de forma natural o con intervención del hombre. Este tipo de reproducción es bastante deficiente, por tal motivo es la menos común. La floración de los guaduales es esporádica con intervalos de tiempo entre 20 y 25 años, la mayoría de sus semillas no son fructíferas, la formación del rizoma es lenta y las plántulas débiles lo que reduce el porcentaje de germinación de las semillas al 15% aproximadamente.
- *Reproducción asexual o vegetativa:* La reproducción asexual es la más utilizada y la más recomendada. En la reproducción asexual no existe la unión o apareamiento de células que den origen a un nuevo individuo, esta se da mediante un proceso fisiológico en el cual el tallo, las raíces, las hojas o alguna parte activa de la planta da lugar a nuevos individuos. Dentro de la reproducción asexual tenemos: Transplante directo, Rizoma y parte del tallo, Rizomas sin tallo, Segmentos de Tallo, Segmentos de Tallo con agua, Riendas laterales, Invitro, Por Chusquines.

**1.1.3 Bondades de la Guadua** La guadua es una planta aprovechable en su totalidad desde la raíz hasta zona apical. Esta planta ha hecho parte del desarrollo del occidente colombiano. En esta zona existe toda una cultura alrededor de la guadua, observando en ella sus bondades para el aprovechamiento económico, social y cultural. Dentro de las bondades de la guadua tenemos:

- *Rápido crecimiento.* La guadua tiene una rata de crecimiento de 12 cm. al día alcanzando su máxima altura aproximadamente a los seis meses. Por su naturaleza la guadua posee un ciclo vegetativo corto alcanzando su edad aprovechable a los seis años después de sembrada, y de ahí en adelante cada tres o cuatro años después del corte.
- *Protección de cuencas y suelos.* La guadua regula el agua en las cuencas hidrográficas, evitando la escasez del preciado líquido, de igual forma controlando la escorrentía superficial protegiendo así el suelo de la erosión ocasionada por las lluvias.

Fotografía 2. Suelo protegido por guadua



La guadua es una planta utilizada a menudo para planes de reforestación<sup>1</sup>. El guadua actúa como un solo cuerpo, sus raíces reticuladas se entrelazan unas con otras, proporcionando de esta forma el agarre de la superficie del terreno.

---

<sup>1</sup> LEON ACOSTA, Jorge. Investigación: Use of the Bamboo in the Control of the Erosion in Mountainous Areas; Cuba, 2001.

- *Fuente de energía a partir de biomasa.* La energía limpia que se obtiene de la biomasa es una alternativa que ha sido tenido en cuenta por los diferentes países del mundo para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> producto del uso del petróleo y el carbón. En Colombia el ministerio de Minas y Transporte ha promovido el uso de la biogasolina compuesta el 90% por la gasolina derivada del petróleo y 10% de etileno producto del tratamiento de la biomasa<sup>2</sup>. La caña de azúcar está siendo utilizada en Colombia como fuente de la biomasa necesaria para la obtención del alcohol etílico. El bambú ya ha sido estudiado para este fin en otros países.
- *Captación de CO<sub>2</sub>.* La guadua en su metabolismo utiliza el gas carbónico (CO<sub>2</sub>) del medio ambiente disminuyendo de esta forma los niveles presentes en la atmósfera. En el protocolo de Kyoto realizado en 1997 se recalcó la importancia de proteger y aumentar las zonas conocidas como sumideros encargadas de las captaciones de CO<sub>2</sub>, y la necesidad de promover el uso de energía limpia disminuyendo la contaminación del medio ambiente.

## 1.2 MADERA LAMINADA ESTRUCTURAL

**1.2.1 Definición** La madera laminada estructural (MLE) es el resultado de la unión encolada entre tablas de dimensiones pequeñas para conformar elementos ya sean paneles, vigas, columnas o arcos de secciones y longitudes ilimitadas; estas tablas se ordenan de tal forma que las fibras de la madera queden paralelas entre si.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Tomado de: <http://www.minminas.gov.co>

<sup>3</sup> CASTRO CASAS, Pilar. Tesis de Maestría: La Madera y su Tecnología en la Construcción de Puentes Peatonales; Universidad Nacional; Colombia, 2005

**1.2.2 Reseña Histórica** Las propiedades de la madera la hacen un material de difícil aplicación de métodos de fabricación industrial tales como la fundición, moldeado, extrusión, forjado y soldadura, como en otros materiales.

Se tiene conocimiento sobre la utilización de la laminación no encolada desde épocas antiguas. En Egipto, (a.C.) a pesar de la escasez de madera, se desarrolló la técnica de la laminación en tablas, que machihembraban y ensamblaban con maestría para resolver el problema de los grandes alabeos producidos por la baja consistencia de la madera disponible<sup>4</sup>. A mediados del siglo XVI Philibert de L'orme se atrevió a desarrollar un sistema constructivo a base de láminas conformadas por listones pequeños amarrados con hojas metálicas y pernos que generaban arcos de luz considerable. El paso de laminado pernado a laminado con adhesivo, fue dado por O. Hetzer, en Weimar quien a comienzos del siglo XX desarrolló métodos para aplicar adhesivo a base de caseína en la madera. Luego desde Alemania se extendió rápidamente a otros países, principalmente a Suiza, Suecia, Noruega, Austria y Estados Unidos. En la década de los 40's se desarrolla la técnica de paneles Lvl (Laminated veneer lumber) en la construcción de hélices para aviones y otras piezas de alta resistencia, pero fue hasta la década de los 60's que se decide introducir este método de laminado en la construcción civil, elaborando paneles y elementos de viga en sección  $\bar{F}$ . Desde los años 90's se viene encontrando en el mercado del laminado los primeros pisos en bambú chino. En Colombia se ha iniciado la explotación de este tipo de elementos estructurales, en la última década en una empresa antioqueña dedicada a elaborar elementos laminados a base de pino Pátula; otras empresas dedicadas a la fabricación de pisos en parquet de bambú y otras maderas.

---

<sup>4</sup> Revista AITIM; Boletín de Información Técnica N° 211; España, Mayo-Junio de 2001.

<sup>5</sup> Revista AITIM; Publicaciones: n° 68 Diciembre de 2002 y n° 71; Brasil Mayo de 2003.

### 1.2.3 Componentes Dentro de los componentes de MLE tenemos:

- **La Madera** La madera es la materia prima y elemento fundamental en el laminado, sus propiedades y características la hacen única en el avance de este tipo de tecnología. El manejo despiadado e inconsciente del hombre con sus recursos ha causado la desaparición de millones de hectáreas de bosques en el mundo, factor primario en la búsqueda de nuevas maneras de utilización de este material. A causa del desarrollo industrial y social que se evidencia en el mundo en el último siglo, se ha exigido una demanda en infraestructura mas versátil, compuesta de elementos cada vez mas fuertes que deben cubrir luces mayores, no convencionales en los sistemas constructivos tradicionales, para satisfacer las condiciones de un determinado proyecto; un ejemplo de esto son las cubiertas para hangares, coliseos, puentes, etc.

Fotografía 3. Coliseo con cubierta de MLE



El sostenimiento del desarrollo en tecnología de maderas esta enmarcado a la presencia de factores que favorecen en forma secuencial y productiva la realización de proyectos a diferentes escalas; desde un proyecto habitacional hasta la elaboración de un modelo económico que gire en torno a un mercado auto sostenible que permita el avance de sociedades.

Se debe promover el desarrollo de tecnologías en maderas que puedan remplazar o reducir el uso de la madera maciza, ya sea para evitar el desperdicio y tala desmedida de bosques, mejoramiento de propiedades físico-mecánicas del material, afloramiento de nuevos estudios en tecnología de materiales, etc. Es necesario entonces, incentivar la investigación pues la producción de madera laminada y sus estudios son relativamente nuevos en comparación al uso que ha tenido la madera en forma estructural a través de la historia de la humanidad, en la elaboración de pequeños puentes, maquinas de guerra, campanarios e infinidad de construcciones.

- **Adhesivos** Los adhesivos son productos de diferentes composiciones: químicas (fenólicas – UF/RF, poliacetato de vinilo – PVA, etileno vinil acetato – EVA), productos naturales (pieles de animales, huesos, resinas de árboles, entre otras)<sup>6</sup>. Estos adhesivos tienen por objeto, unir dos superficies de madera para integrar y formar un conjunto que sea capaz de resistir las condiciones para las que se diseña, caracterizándose por la función vital que desempeña en el compuesto que es la de resistir los esfuerzos en la interfase y ser inmune a agentes físicos, biológicos, etc.

### COMPOSICIÓN DE LOS ADHESIVOS

Un adhesivo se conforma de:

- *Componente principal.* Material que actúa de ligante, actualmente se corresponden con productos orgánicos de síntesis.
- *Endurecedores.* Sustancias que se añaden para acelerar su fraguado.

---

<sup>6</sup> Tomado de: <http://infomadera.net/empresa/producto/766/info/14146>, Los adhesivos y la aplicación de adhesivo en la madera

- *Cargas*. Sustancias que se añaden para mejorar las características del adhesivo. Pueden ser productos insecticidas, fungicidas, etc.
- *Complementos*. Sustancias que se añaden para rebajar su precio.
- *Solventes*. Vehículo en que va disuelto el adhesivo, pueden ser acuosos, orgánicos, hidrodispersables, espumas, etc.

### TIPOS DE ADHESIVOS

Los adhesivos se pueden clasificar en los siguientes tipos:

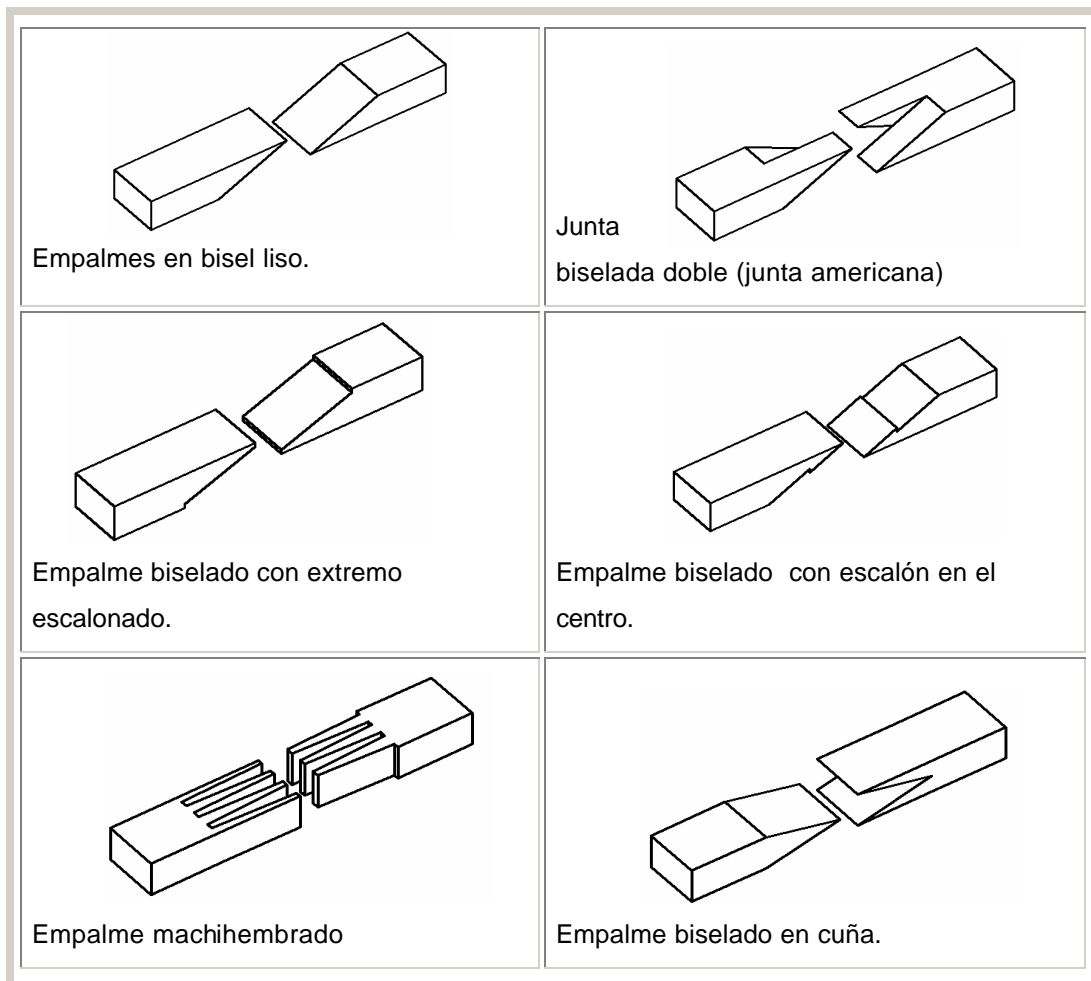
- Adhesivos o colas inorgánicos (de silicato sódico)
- Adhesivos orgánicos
- Adhesivos o colas naturales: animales (pieles, huesos, pescado, albúmina, caseína) y vegetales (almidón, semilla de soja)
- Adhesivos sintéticos. Dentro de los adhesivos sintéticos, que son las que más se utilizan actualmente, se distinguen: *Adhesivos termoplásticos*, una vez fraguados recobran su plasticidad por la acción del calor, ejemplos de estas son: Emulsiones vinílicas, acetato de polivinilo (PVAC), poli cloruro de vinilo (PVC), Acetato de vinilo y etileno (EVA), etc. *Adhesivos termoestables*, una vez fraguadas no recobran su plasticidad por la acción del calor, ejemplos de estos son: Urea formaldehído (UF), Melamina urea formaldehído (MUF), Melamina fenol formaldehído (MPF), Fenol formaldehído (PF), Resorcina formaldehído (RF) y de resorcina - fenol formaldehído (RPF), Isocianato

Las resinas estructurales más frecuentes que se emplean en estructuras de madera son las aminas y las fenólicas, con modificaciones como fenolresor- cinol para uso exterior. Resinas amino urea-formaldehído (U/F) son las más empleadas en la industria de la madera estructural.

- **Epalmes Longitudinales** Los empalmes en MLE son empleados para generar continuidad entre las láminas y construir elementos de tamaños

mayores partiendo de longitudes cortas. Una junta en el laminado se diseña para transmitir carga longitudinal, lo cual exige alineaciones precisas entre láminas y de mejor o igual resistencia que el material ensamblado. Un empalme ideal es aquel que se pueda auto alinear y auto posicionar, de fácil construcción y que demande una maquinaria no muy compleja para su elaboración. La fabricación de empalmes demandan precisión. En la figura 1 se pueden apreciar algunos empalmes comunes.

Figura 1. Tipos de Empalmes longitudinales.



**1.2.4 Propiedades** La evaluación de las propiedades de MLE se basan en las siguientes normas:

- American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Norma Técnica Colombiana para Maderas (NTC).
- Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino (Junta del cuerdo de Cartagena).

Las propiedades del laminado estructural se clasifican en:

- **Propiedades Físicas** Las propiedades físicas evaluadas en la guadua son:
  - *Densidad.* Es la relación entre la masa y el volumen de una pieza de madera y se calcula en gramos por centímetro cúbico. La densidad se calcula con la ecuación 1.

$$d = m/v \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (1)$$

Este dato proporciona una primera indicación sobre el comportamiento mecánico ante ciertas sollicitaciones. En la madera laminada se puede conseguir una densidad homogénea debido a la manipulación que se puede tener del material.

- *Humedad.* Esta propiedad indica la capacidad de la madera de absorber o desprender agua dependiendo de las condiciones ambientales. La madera secada al aire contiene entre un 10-15% de humedad, rango que se debe garantizar para evitar la generación de esfuerzos en la línea de aplicación de adhesivo en la laminación. En la medición de la humedad de una madera se toma su peso en su estado inicial y luego se somete a secado al

horno a 103°(+.) 2° C<sup>7</sup> hasta que alcance un peso constante. El contenido de humedad se calcula con la ecuación 2.

$$CH\% = (P_i - P_s) * 100 / P_s \quad (2)$$

Una de las ventajas de obtener láminas de baja dimensión en el sentido perpendicular a las fibras es poder bajar el contenido de humedad del límite normal en madera maciza.

- *Contracción e Hinchamiento.* Cuando la madera pierde humedad se contrae y cuando absorbe se dilata, la consecuencia de esto se observa en las vigas rectangulares rajadas y las tablas delgadas con alabeo. Es importante controlar esas variaciones en la madera que se va a aplicar adhesivo. Los cambios en la dimensión en las láminas ya encoladas pueden ocasionar la inducción de esfuerzos en la línea de aplicación de adhesivo y provocar fallas prematuras en el compuesto. La contracción se calcula por medio de la ecuación 3

$$C\% = (D_v - D_{sf}) * 100 / D_v \quad (3)$$

La contracción en sentido tangencial es más o menos el doble de la radial, mientras que la variación longitudinal es despreciable.

- *Porosidad.* Propiedad relacionada con el contenido de humedad en la madera y época de corte, una madera cortada en verano luego de un proceso de secado será más densa que una madera cortada en invierno. Una madera porosa que va ha ser utilizada en el laminado demandará una presión de prensado, debido a que la porosidad y rugosidad de la superficie

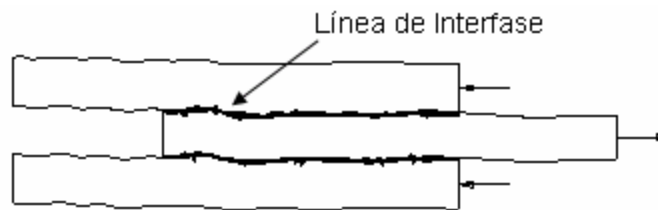
---

<sup>7</sup> Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Editado por la junta del acuerdo de Cartagena. Lima-Perú, 1984.

frenan la fluidez del adhesivo evitando la penetración y contacto del mismo generando una línea de aplicación de adhesivo irregular.

- *Textura Superficial.* Es la interfase de la masa de la madera y la atmósfera; es el límite producido por las herramientas mecánicas, advirtiendo que este estudio no involucra una estructura molecular o microscópica. El incremento de la rugosidad de la superficie y porosidad, mejora la resistencia hasta cierto punto, luego el incremento del área real (área porosa) conduce a tensiones localizadas en la línea del adhesivo (Ver figura 2), disminuyendo la resistencia al cortante en la línea de aplicación.

Figura 2. Interfase de superficies rugosas



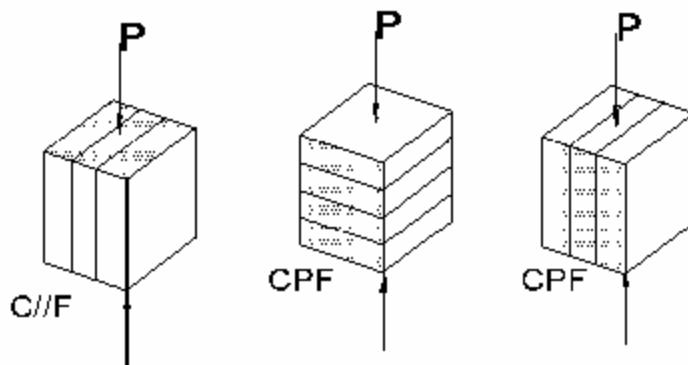
Las variaciones de rugosidades provocan cambios en los métodos óptimos de aplicación de adhesivo; las superficies rugosas requieren presiones de aplicación de adhesivo más altas para obtener la misma área de contacto de las superficies que encajan unas entre otras. La mojabilidad y humectación están directamente afectadas por el envejecimiento de la superficie y tensión superficial de los adhesivos; la humectabilidad influye en la capacidad de extenderse el adhesivo en la superficie y penetrar en grietas, fisuras y en los capilares de las células de la madera. La penetración es entonces importante controlarla para una buena unión ya que la rugosidad va asociada a fisuras que pueden concentrar esfuerzos e inducir el deterioro de la pieza.

- **Propiedades Mecánicas** Las propiedades mecánicas de la MLE, se mejoran en comparación con la madera maciza ya que al trabajar láminas se eliminan defectos naturales en la madera tales como nudos, rajaduras, disminución del contenido de humedad generando un material más homogéneo. En estructuras de MLE se definen cuatro tipos de efectos diferentes en los cuales se destacan: compresión, tensión, flexión y corte.
- *Esfuerzo de compresión* Este esfuerzo se produce cuando las fuerzas actuantes tienden a comprimir o aplastar el material resistente. La madera clasificada como material ortotrópico presenta tres tipos de respuesta según la orientación de la fibra y dirección de la carga actuante, las cuales son: Compresión paralela a la fibra y dos compresiones perpendiculares a la fibra (Ver figura 3).

El esfuerzo a compresión se calcula con la ecuación 4.

$$s_c = \frac{P(kg)}{A(cm^2)} \quad (4)$$

Figura 3. Tipos de compresión en la madera



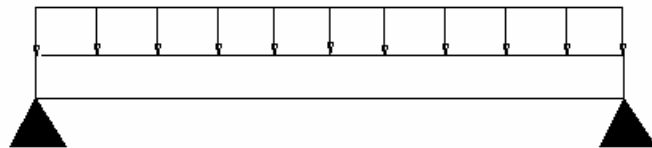
- *Esfuerzo de tracción.* Este esfuerzo es el producto de la reacción que opone la madera al estiramiento de las fibras en el sentido paralelo al grano y la resistencia al desprendimiento en el sentido perpendicular a la fibra. El esfuerzo a tracción se calcula con la ecuación 5.

$$s_T = \frac{P(kg)}{A(cm^2)} \quad (5)$$

- *Esfuerzo de flexión.* Es la combinación de esfuerzos a compresión, tracción y cortante en la sección transversal de un elemento, comunes en las vigas. (Ver figura 4). La posibilidad de fabricar vigas de MLE de luces considerables, exige estudios rigurosos de este comportamiento. En la madera a diferencia del concreto y el acero no se puede lograr una falla balanceada para una sección uniforme debido a la diferencia que existe entre la resistencia a la compresión y tensión de las fibras. El esfuerzo a flexión se calcula con la ecuación 6.

$$s_B = \frac{M * Y}{I} \quad (6)$$

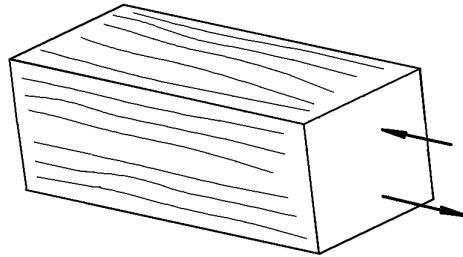
Figura 4. Flexión en viga.



- *Esfuerzo cortante.* La resistencia ocasional generada por una viga a fuerzas de cizalla en sentido horizontal (Ver figura 5) se llama resistencia al esfuerzo de cortante. En MLE se debe precisar la resistencia al

deslizamiento entre láminas analizando la resistencia al corte de las juntas o interfases entre las láminas y el adhesivo.

Figura 5. Cortante Longitudinal.



Al garantizar una capa de cola delgada, la junta se puede considerar como de una madera homogénea y las tensiones en la madera se pueden calcular como en cualquier nivel de la probeta de madera. El esfuerzo a cortante se calcula con la ecuación 7.

$$t = \frac{V * Q}{I * t} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

**1.2.5 Ventajas de la Madera Laminada Estructural** Las ventajas de la madera estructural se pueden enmarcar en un listado el cual podría extenderse a criterio de los especialistas. A continuación se mencionan algunos de estos ya reconocidos en la industria de la madera:

- Las construcciones hechas en madera laminada se caracterizan notablemente por la ventaja que ofrece su bajo peso respecto a la resistencia ofrecida de los elementos laminados, respecto a otros materiales como el concreto o el acero.

- Ante la presencia de fuego la madera laminada y debido a su sección permite la formación de una capa de carbón en la superficie exterior del elemento y así retrazando la combustión de la madera, dando tiempo a una reacción por parte de las personas beneficiadas por la estructura.
- La presencia de capas de adhesivos en las líneas de aplicación de adhesivo no hace agradable la madera a eventuales ataques por insectos como las termitas y xilófagos, ya que estos prefieren emigrar que comer una capa de un adhesivo no presente en su dieta.
- La utilización de láminas pequeñas y la técnica de la aplicación de adhesivo, hacen posibles la fabricación de elementos de sección variada y de tamaños no logrados antes con madera maciza.
- Una clasificación previa de las láminas según resistencia y densidad, permite la colocación de las láminas más resistentes en lugares de mayor demanda de esfuerzos. (adherencia y adhesivos).
- La utilización de la madera como materia prima fundamental en MLE hacen de este una materia renovable de las cuales se pueden llevar controles, que permitan una excelente calidad en la construcción de estructuras de madera sin que se afecten las condiciones ambientales del medio en el que se extrae.
- La MLE abre la posibilidad de fabricar elementos curvos de longitudes nunca antes vistas en elementos fabricados con madera maciza.
- El mejoramiento de las propiedades mecánicas, disminución del contenido de humedad, aumento de la estabilidad dimensional de la madera disminuyendo la distorsión de las láminas.

La madera laminada cuenta con algunas desventajas como:<sup>8</sup>

- Mayor costo de fabricación.
- Necesidad de mano de obra especializada.
- Equipos especiales para elaboración de empalmes.
- Dificultad de manejo y transporte para piezas grandes especialmente las curvadas

---

<sup>8</sup> HOUWINK WASSENAAR, R.; SALOMON, G. Enciclopedia De La Química Industrial; Tomo 4, Capítulo 14, Holanda, 1973.

## 2. CARACTERIZACION DEL LAMINADO DE GUADUA

### 2.1 GENERALIDADES

Para la desarrollo del proyecto se siguió el proceso descrito a continuación

- *Elegir las variables a evaluar, que cumplieran con los objetivos.*

En cuanto a la elección de las variables a evaluar, se escogieron de acuerdo a estudios ya realizados sobre propiedades de la guadua, las cuales son posibles analizar debido a las facilidades en el laboratorio de resistencia y a las normas disponibles.

- *Obtención de la materia prima GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNT.*

La tarea de conseguir la materia prima, Guadua, requirió un estudio aparte; las condiciones apropiadas que permitieran desarrollar en un tiempo justo y que dejara parámetros constantes que no influenciaran directamente en el estudio. La materia prima fue adquirida en un punto de distribución de Guadua proveniente del eje cafetero, ubicado en la zona metropolitana. Se dejaron constantes algunas propiedades de dicho material como sitio de cultivo, edad y tiempo de corte, tipo de preservado e inmunizado, tiempo y forma de secado, logrando así una disminución del tiempo necesario para el desarrollo del proyecto. La cantidad de Guadua a comprar se determinó por medio de un análisis muy somero sobre el número de ensayos a realizar y la cantidad de probetas a elaborar, junto con el presupuesto destinado para el mismo, tiempo de maquinado de las laminas sin hacer énfasis en el lugar en donde se iban a

desarrollar las actividades y lógicamente la mano de obra que iba a estar destinada durante ese tiempo de maquinado.

- *Equipo o maquinaria disponible maquinaria y herramienta necesaria para la elaboración de probetas y especímenes.*

Las maquinas requeridas para este tipo de trabajo no se encuentran en nuestro medio, así que se trabajó con maquinaria no apta para la fabricación de láminas pero que igual se desempeñaron bastante bien. Luego de gestionar en varios sitios se llegó a un acuerdo con la escuela de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander (UIS) del préstamo de herramienta, maquinaria y espacio para el desarrollo de las actividades y de la ejecución de las mismas por parte de nosotros, el grupo investigador, el cual se hizo responsable del buen uso y comportamiento de los talleres.

## **2.2 SELECCIÓN DEL ADHESIVO**

La selección del adhesivo es pieza clave para la buena funcionabilidad del laminado estructural, se buscó en el mercado posibles adhesivos utilizados en la industria del laminado, se hicieron varios contactos a empresas dedicadas a este negocio y sugirieron dos tipos de adhesivos a base de Poliacetato de Vinilo (PVA). De la bibliografía se obtuvo información sobre la utilización de adhesivos a base de urea y formaldehído en estructuras laminadas, sin embargo el alto costo del material, la escasez del producto y el proceso de aplicación del mismo no hizo viable su utilización. Se revisó los adhesivos utilizados en las carpinterías, encontrando la posibilidad de utilizar un adhesivo, conocido como “LA COLA DE CARPINTERO”. Finalmente se plantearon tres adhesivos a los cuales se les hizo análisis: PVA1, PVA2, y COLA.

- PVA1: Adhesivo sintético a base de polivinil acetato (PVA), líquido viscoso, de color blanco. Se usa para adherir madera, triplex, tablex, hard-board, aglomerados, enchapes, tablemac y similares. Su modo de empleo consiste en aplicar el adhesivo con rodillo o espátula sobre las superficies a pegar, se deja secar durante cinco minutos aproximadamente para después unir las superficies y aplicar presión uniforme durante mínimo una hora.
  
- PVA2: Adhesivo sintético a base de polivinil acetato (PVA) en una alta concentración, complementado con aditivos de poder adhesivo que le dan un color beige. Se usa para adherir madera, triplex, aglomerados, hard-board, tablemac, y enchapes; es ideal para pegar todo tipo de maderas con porcentaje de humedad altos (15%), en procesos que requieran de un tiempo de prensado corto. Su modo de empleo consiste en aplicar el adhesivo con rodillo o espátula sobre las superficies a pegar, se une las superficies y se aplica un prensado uniforme durante 30 minutos mínimo.
  
- COLA: Adhesivo natural a base de colágeno (proteína animal, componente de los huesos y tejidos conectivos de los mamíferos)<sup>9</sup>, de color café brillante. En el mercado se consigue en estado sólido pegajoso. La cola de carpintero ha sido el adhesivo utilizado las carpinterías para pegar todo tipo de madera con gran resultado. La aplicación de la cola debe hacerse en estado líquido, para tal fin debe derretirse en agua con un baño maría, hasta que alcance una viscosidad parecida a la de la miel; una vez lista se aplica sobre la superficie rápidamente, ya que a temperatura ambiente la cola se seca de forma casi instantánea; se une las superficies y se aplica presión uniforme durante una hora mínimo.

Para seleccionar el adhesivo se tuvo en cuenta únicamente el comportamiento mecánico a corto plazo, descartando las propiedades físicas y el comportamiento

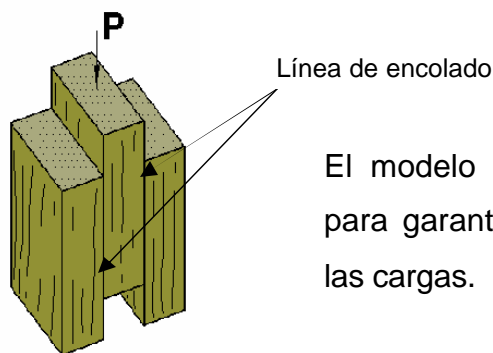
---

<sup>9</sup> Tomado de: Enciclopedia Encarta 2005

ante agentes biológicos, corrosivos o degradantes. Para tal fin se desarrollaron los ensayos descritos a continuación:

- *Ensayo De Cortante En Adhesivo* Primer criterio de elección entre los adhesivos propuestos, en total se elaboraron 15 probetas, falladas en la maquina universal de maderas. Este ensayo deja ver la resistencia que ofrece la línea de encolado al ser sometida a una carga paralela al plano de la junta. Fotografía 4. La norma ASTM D 905-49 indica la forma de elaborar este ensayo utilizando tan solo dos bloques que generan un solo solape, pero debido a la falta de la máquina para ejecutar este ensayo adecuadamente, se optó por seguir las recomendaciones de Perry<sup>10</sup> elaborar una probeta de doble solape (Ver figura 6) y fallarla en la maquina universal para maderas.

Figura 6. Probeta para medir cortante en adhesivo



El modelo de probeta es sometido a cortante doble para garantizar una estabilidad al momento de aplicar las cargas.

*Probetas a ensayar:*

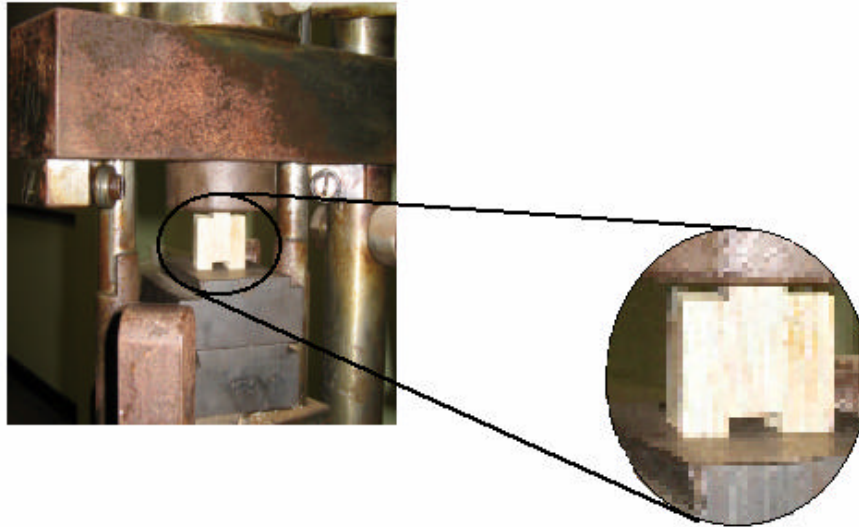
- 5 Probetas de cortante PVAC1
- 5 Probetas de cortante PVAC2

---

<sup>10</sup> HOUWINK WASSENAAR, R.; SALOMON, G., Op. Cit., pag. 19

- 5 Probetas de cortante PCC

Fotografía 4. Ensayo de Cortante para Adhesivo



El área de contacto entre láminas fué de 1" x 1" <sup>11</sup>(Ver anexo 3)

- *Ensayo De Tracción* Ensayo tomado como segundo criterio de elección de adhesivo, en total se elaboraron 29 probetas, falladas en la maquina para tracción INSTRON. La norma ASTM D 897-49 propone probetas tipo cápsula para ensayar a tracción uniones de madera o metal; esta norma dió el fundamento para hacer una adaptación del ensayo, para juntas longitudinales en la maquina INSTRON (Ver Anexo 1).

*Probeta a ensayar (Ver Fotografía 5):*

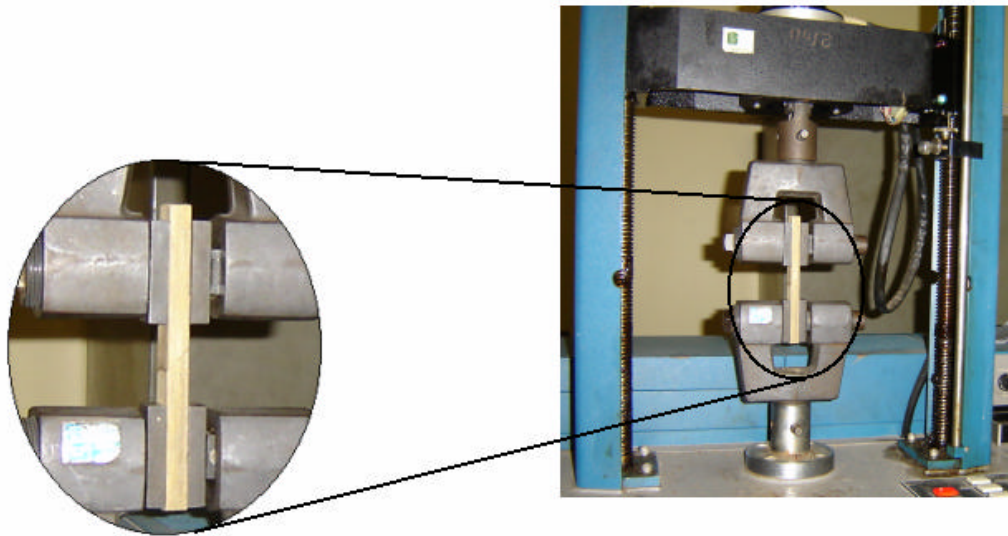
- 10 Probetas de tracción PVA1

---

<sup>11</sup> Ibid., pag. 23

- 9 Probetas de tracción PVA2
- 10 Probetas de tracción PTC

Fotografía 5. Ensayo de Tracción para Adhesivo



El ancho de las probetas se escogió de 1" con bisel de 45° (Ver anexo 3).

## 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GUADUA

Los parámetros físicos que se analizaron fueron humedad, densidad de la lamina de guadua y densidad del compuesto guadua adhesivo.

**2.3.1 Humedad** La guadua como material poroso y altamente fibroso, es sensible a las variaciones de humedad, para llevar un control de esta propiedad se basó en las recomendaciones propuestas por manual del grupo Andino<sup>12</sup>. Se elaboraron probetas de 15x3x0.8 cm. (Ver figura 7) de las cuales se registraron sus pesos

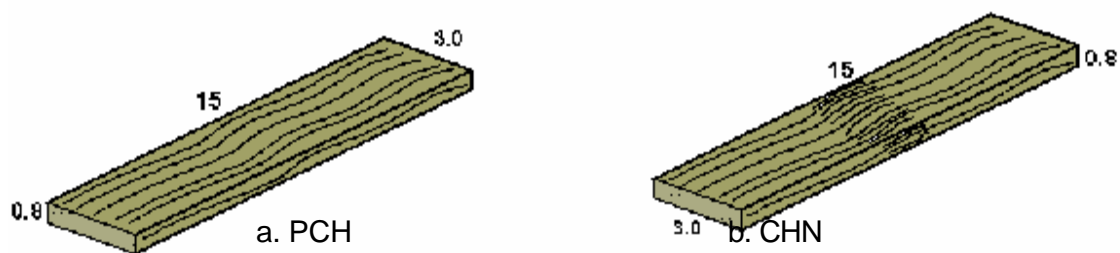
<sup>12</sup> Manual de Diseño Para Maderas Del Grupo Andino. Op., Cit., pag. 13

dos veces por semanas durante seis semanas para observar el cambio de sus pesos con la temperatura y humedad del ambiente (Ver Anexo 2). Estas probetas se manipularon en estado seco desde el inicio de la toma de los pesos.

*Tipo de probetas:*

- Probetas sin nudo PCH (Ver figura 7.a)
- Probetas con nudo CHN (Ver figura 7.b)

Figura 7. Probetas para Medición de Contenido de Humedad.



Finalmente se sometieron a un secado en un horno a  $103^{\circ}\text{C} \pm$ , durante 24 horas y revisando luego cada hora que el peso final seco al horno fuera estable.

**2.3.2 Densidad** La relación de peso volumen de la guadua fue tomada a partir de las mismas probetas utilizadas para humedad. Se registró densidad seca al aire  $D_s$  y densidad anhidra  $D_a$ . La densidad seca al aire se calcula con la ecuación 8. La densidad anhidra se calcula con la ecuación 9.

$$D_s = \frac{W}{V} \text{ kg / cm}^3 \quad (8)$$

$$D_a = \frac{W_a}{V} \text{ kg / cm}^3 \quad (9)$$

## 2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LAMINADO

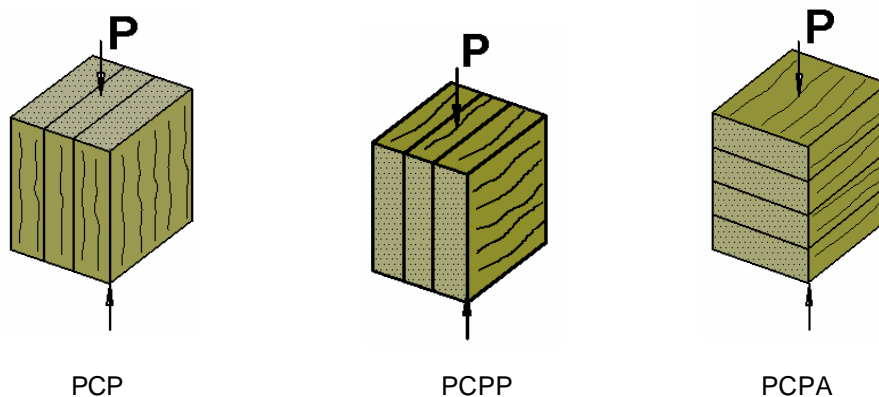
Para la determinación de las propiedades mecánicas del compuesto, Guadua adhesivo, se plantean una serie de ensayos básicos característicos en las maderas que fueron previamente enunciados en el marco teórico.

**2.4.1 Ensayo De Compresión** Se sometió a fuerza de compresión a varios tipos de probetas, para ensayar y obtener resultados según la dirección de la carga respecto a la fibra de la guadua.

*Tipos de probetas (Ver figura 8):*

- Compresión paralela. Ocho probetas PCP
- Compresión perpendicular ocho probetas PCPP
- Compresión perpendicular por aplastamiento siete probetas PCPA

Figura 8. Probetas Tipo de Compresión.



Estas probetas y ensayos fueron elaborados guardando las proporciones según las normas NTC784 y NTC785.

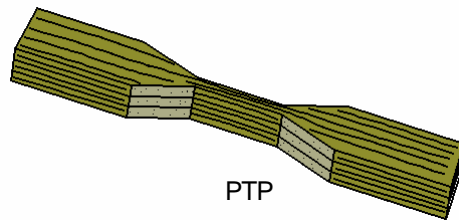
Fotografía 6. Ensayo de Compresión de Laminado



Las dimensiones de las probetas se escogieron de 3cmx3cmx4cm (Ver Anexo C).

**2.4.2 Ensayo De Tracción** Para medir esta propiedad, se realizó un ensayo el cual consistió en exponer las fibras del compuesto, Guadua adhesivo (Ver figura 9), a fuerzas de tracción registrando cargas ultimas de falla calculando esfuerzos últimos de falla. Para el ensayo se hizo una adaptación de la norma NTC 944 de tracción paralela de maderas. Se variaron las dimensiones para poder adaptar las probetas a la máquina universal de ensayos marca TREBEL (Ver Anexo 1). Se elaboraron ocho probetas PTP, utilizando tres de prueba inicial para adaptación de las mordazas de la máquina las cuales presentaron inconvenientes, ya que siendo la Guadua un material fibroso y con alto contenido de sílice opuso resistencia al agarre en los extremos de las probetas; se llegó a la solución de pegar lija en los extremos de cada probeta para que actuara como antideslizante (Ver fotografía 7) En el ensayo no se tomaron datos de deformación debido a que el deslizamiento presentado no facilitaba la dicha medición.

Figura 9. Probeta de Tracción



Fotografía 7. Probetas de Tracción modificadas.



Las dimensiones de las probetas en la garganta se escogieron de 0.6 cm x 2.2 cm (Ver anexos 3)

**2.4.3 Ensayo De Flexión** El ensayo se basó en la NTC 663, se cargó en el centro de la luz utilizando apoyos simples. Se tomaron datos de carga y deformación.

Fotografía 8. Ensayo de Flexión.

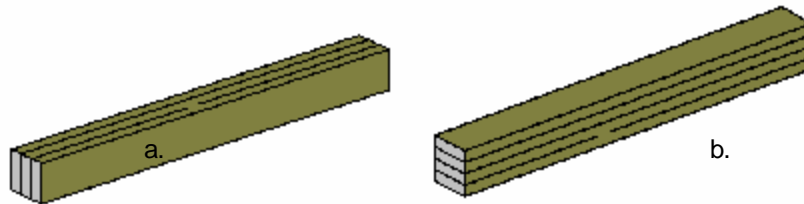


Para lograr una propuesta cercana a los efectos que ocurren en la realidad se plantean dos tipos de flexión:

*Tipos de probetas:*

- Flexión laminado Vertical 7 probetas PFV (Ver figura 10a).
- Flexión laminado Horizontal 8 probetas PFH (Ver figura 10b).

Figura 10. Probetas Tipo de Flexión.



Cada uno de estos ensayos se define para encontrar el módulo de rotura (Ver ecuación 10) y módulo de elasticidad (Ver ecuación 11) para el comportamiento del compuesto de láminas superpuestas vertical y horizontalmente.

$$s_B Ul_t = \frac{3 * (P_{\max}) * L}{2 * b * h^2} \quad (10)$$

$$E = \frac{(P_p) * L^3}{48 * I * \Delta} \quad (11)$$

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ADHESIVO

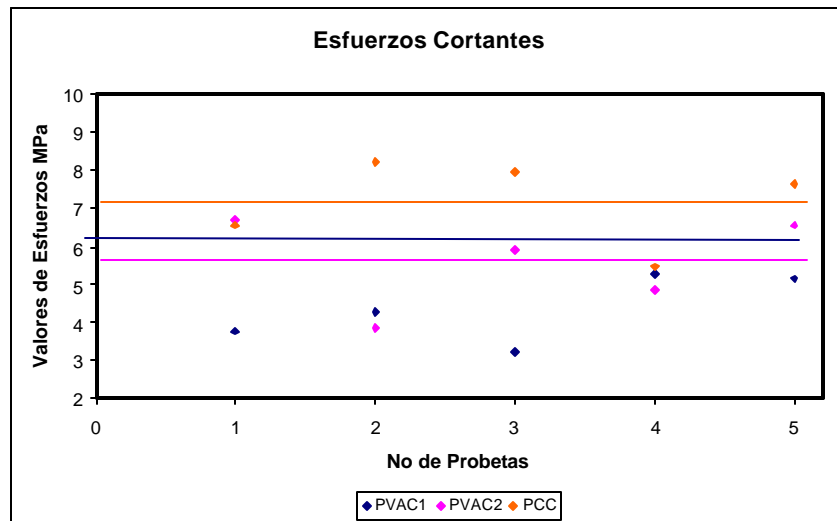
**3.1.1 Ensayo de Cortante en Adhesivos** En la tabla 1 se observa los valores obtenidos para el ensayo de cortante en los diferentes adhesivos probados. El esfuerzo máximo promedio resistido por el adhesivo PVA1 fue de 4.34 MPa con una desviación de 0.88 MPa, para el adhesivo PVA2 el esfuerzo máximo promedio resistido fue 5.58 MPa y desviación de 1.21 MPa para la Cola el esfuerzo máximo promedio resistido fue 7.18 MPa y desviación de 1.15 MPa.

Las probetas tipo PCC desarrollaron mayor resistencia al cortante en la línea de encolado que las probetas tipo PVAC1 y PVAC2. En la gráfica 1 se observa como los puntos que corresponden a los datos de PCC (Color naranja) están por encima de los puntos representativos de los adhesivos PVA1 y PVA2.

Tabla1. Esfuerzos cortantes en adhesivos

| Adhesivo    | Probeta | Ac mm <sup>2</sup> | P max KN | Esf-Mpa | Esf prom- Desv  |
|-------------|---------|--------------------|----------|---------|---|
| <b>PVA1</b> | PVAC1 1 | 6,250              | 4,7      | 3,76    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>4,34 Mpa<br><b>Desviación</b><br>0,88 MPa |
|             | PVAC1 2 | 6,890              | 5,9      | 4,28    |   |
|             | PVAC1 3 | 6,375              | 4,1      | 3,22    |   |
|             | PVAC1 4 | 6,250              | 6,6      | 5,28    |   |
|             | PVAC1 5 | 6,370              | 6,55     | 5,14    |   |
| <b>PVA2</b> | PVAC2 1 | 6,38               | 8,55     | 6,71    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>5,58 Mpa<br><b>Desviación</b><br>1,21 MPa |
|             | PVAC2 2 | 7,14               | 5,5      | 3,85    |   |
|             | PVAC2 3 | 6,76               | 8        | 5,92    |   |
|             | PVAC2 4 | 6,50               | 6,3      | 4,84    |   |
|             | PVAC2 5 | 6,63               | 8,7      | 6,56    |   |
| <b>COLA</b> | PCC 1   | 6,24               | 8,2      | 6,57    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>7,18 Mpa<br><b>Desviación</b><br>1,15 MPa |
|             | PCC 2   | 5,28               | 8,7      | 8,24    |   |
|             | PCC 3   | 5,76               | 9,2      | 7,99    |   |
|             | PCC 4   | 6,48               | 7,1      | 5,48    |   |
|             | PCC 5   | 5,76               | 8,8      | 7,64    |   |

Gráfica 1. Esfuerzos cortantes promedio en adhesivos



En el ensayo se observó dos tipos de falla:

- Falla por cortante en la guadua: esta falla se presentó cuando en la interfase coincidía para las dos láminas la superficie interna de la guadua caracterizada por su baja densidad<sup>13</sup> formando una junta débil. Este tipo de probetas se descartaron debido a que la falla ocurre en la guadua y no en el adhesivo, por lo que no se puede obtener la resistencia del mismo.
- Falla por cortante en la línea de encolado: las probetas que presentaron este tipo de fallas se calificaron como idóneas para el resultado del ensayo. La falla se presenta en la línea de encolado primero que en la guadua permitiéndose obtener valores de resistencia al cortante en el adhesivo. (Ver fotografía 9).

<sup>13</sup> CAMACHO, Gloria. LONDOÑO, Ximena, LÓPEZ, Yamel y RIAÑO, Néstor. Caracterización Anatómica del Culmo de Guadua Angustifolia Kunt.

Fotografía 9. Falla por cortante en adhesivo



**3.1.2 Ensayo De Tracción En Adhesivos** En la tabla 2 se observa los valores obtenidos para el ensayo de tracción en los diferentes adhesivos a probar. El esfuerzo máximo promedio resistido por el adhesivo PVA1 fue de  $s_{PN} = 3.17$  MPa con una desviación de 1.03 MPa, para el adhesivo PVA2 el esfuerzo máximo promedio resistido fue  $s_{PN} = 2.57$  MPa y desviación de 0.26 MPa para la Cola el esfuerzo máximo promedio resistido fue  $s_{PN} = 7.07$  MPa y desviación de 2.51 MPa.

Fotografía 10. Falla por tracción en adhesivo



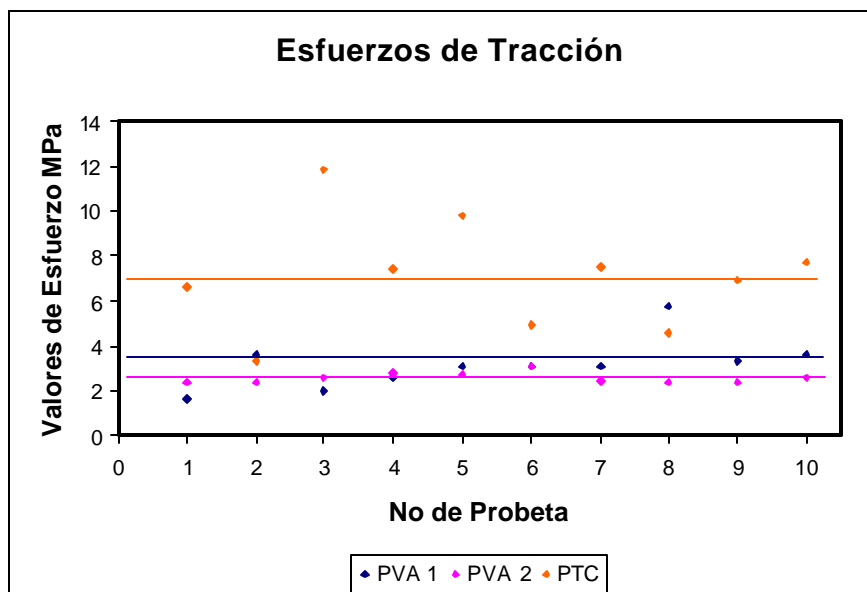
Se observa el buen comportamiento que desarrolla la junta formada por la COLA y la guadua respecto a la junta de los adhesivos a base de PVA. En la gráfica 2 se observa mayor dispersión en los puntos correspondientes a PTC, sin embargo éstos se encuentran en su totalidad por encima de los puntos correspondientes a las demás probetas. En la gráfica 2 las líneas rectas indican el valor promedio de los datos para cada tipo de adhesivo. Se observó la falla de la junta por esfuerzos combinados de tracción y cortante, fallando el adhesivo. (Ver fotografía 10).

El adhesivo con mejor comportamiento mecánico a partir de los ensayos realizados fue la Cola de Carpintero. En este proyecto y con base en estos resultados se optó por la utilización de la cola como adhesivo para la elaboración del laminado.

Tabla 2. Esfuerzos de tracción en adhesivos.

| Adhesivo     | Probeta | Ac mm2 | P max KN | Esf-Mpa | Esf prom- Desv  |
|--------------|---------|--------|----------|---------|---|
| <b>PVA 1</b> | PVA1 1  | 349,31 | 8,00     | 1,62    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>3,17 MPa<br><br><b>Desviación</b><br>1,03 MPa |
|              | PVA1 2  | 359,95 | 18,50    | 3,63    |   |
|              | PVA1 3  | 377,76 | 10,50    | 1,97    |   |
|              | PVA1 4  | 374,20 | 13,50    | 2,55    |   |
|              | PVA1 5  | 370,64 | 16,20    | 3,09    |   |
|              | PVA1 6  | 367,70 | 16,20    | 3,12    |   |
|              | PVA1 7  | 357,74 | 15,50    | 3,06    |   |
|              | PVA1 8  | 339,55 | 27,50    | 5,73    |   |
|              | PVA1 9  | 363,28 | 17,00    | 3,31    |   |
|              | PVA1 10 | 352,82 | 18,00    | 3,61    |   |
| <b>PVA 2</b> | PVA2 1  | 386,42 | 13,00    | 2,38    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>2,57 MPa<br><br><b>Desviación</b><br>0,26 MPa |
|              | PVA2 2  | 377,17 | 12,50    | 2,34    |   |
|              | PVA2 3  | 374,77 | 13,70    | 2,58    |   |
|              | PVA2 4  | 386,42 | 15,50    | 2,84    |   |
|              | PVA2 5  | 382,26 | 14,90    | 2,76    |   |
|              | PVA2 6  | 345,69 | 15,00    | 3,07    |   |
|              | PVA2 7  | 377,99 | 13,00    | 2,43    |   |
|              | PVA2 8  | 369,17 | 12,50    | 2,39    |   |
|              | PVA2 9  | 380,14 | 12,50    | 2,33    |   |
| <b>COLA</b>  | PTC 1   | 378,30 | 3,55     | 6,64    | <b>Esfuerzo Promedio</b><br>7,07 MPa<br><br><b>Desviación</b><br>2,51 MPa |
|              | PTC 2   | 383,83 | 1,80     | 3,32    |   |
|              | PTC 3   | 386,42 | 6,50     | 11,89   |   |
|              | PTC 4   | 361,66 | 3,80     | 7,43    |   |
|              | PTC 5   | 360,62 | 5,00     | 9,80    |   |
|              | PTC 6   | 367,70 | 2,55     | 4,90    |   |
|              | PTC 7   | 368,53 | 3,90     | 7,48    |   |
|              | PTC 8   | 372,72 | 2,40     | 4,55    |   |
|              | PTC 9   | 383,37 | 3,75     | 6,92    |   |
|              | PTC 10  | 351,42 | 3,85     | 7,75    |   |

Gráfica 2. Dispersión de esfuerzos de Tracción en adhesivos



## 3.2 PROPIEDADES FÍSICAS

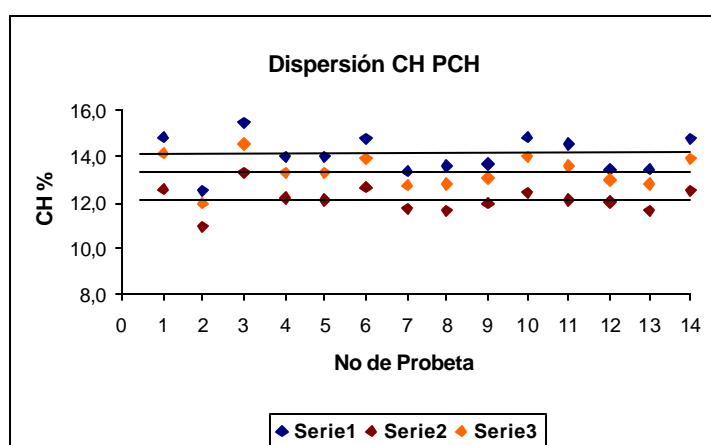
**3.2.1 Humedad** El registro tomado de la humedad sobre las probetas aumentaba (Ver Sección 2.3.1) o disminuía sin tener una tendencia clara (Ver Anexo B). Durante el periodo de la toma de estos datos, el clima del ambiente tuvo un comportamiento inestable, con días muy calurosos, seguidos por días lluviosos, aún se observó variabilidad de clima en un mismo día.

De las probetas sin nudo el máximo contenido de humedad promedio durante el periodo de observación fue de 14.1 %, el mínimo contenido de humedad promedio de 12.1%, y el promedio general obtenido fue de 13.4% (ver tabla 3). De las probetas con nudo el máximo contenido de humedad promedio durante el periodo de observación fue de 13.8 %, el mínimo contenido de humedad promedio de 12.0%, y el promedio general obtenido fue de 13.1% (ver tabla 4).

Tabla 3. Contenido de humedad PCH

| Probeta PCH       | CH % Max | CH % Min | CH % Prom |
|-------------------|----------|----------|-----------|
| 1                 | 14.9     | 12.6     | 14.1      |
| 2                 | 12.5     | 10.9     | 11.9      |
| 3                 | 15.4     | 13.3     | 14.5      |
| 4                 | 14.0     | 12.2     | 13.3      |
| 5                 | 14.0     | 12.1     | 13.3      |
| 6                 | 14.8     | 12.6     | 13.9      |
| 7                 | 13.4     | 11.7     | 12.8      |
| 8                 | 13.6     | 11.6     | 12.8      |
| 9                 | 13.7     | 12.0     | 13.0      |
| 10                | 14.8     | 12.5     | 14.0      |
| 11                | 14.5     | 12.1     | 13.6      |
| 12                | 13.4     | 12.1     | 12.9      |
| 13                | 13.4     | 11.7     | 12.8      |
| 14                | 14.7     | 12.5     | 13.9      |
| <b>Promedio</b>   | 14.1     | 12.1     | 13.4      |
| <b>Desviación</b> | 0.8      | 0.6      | 0.7       |

Gráfica 3. Dispersión Contenido de Humedad PCH



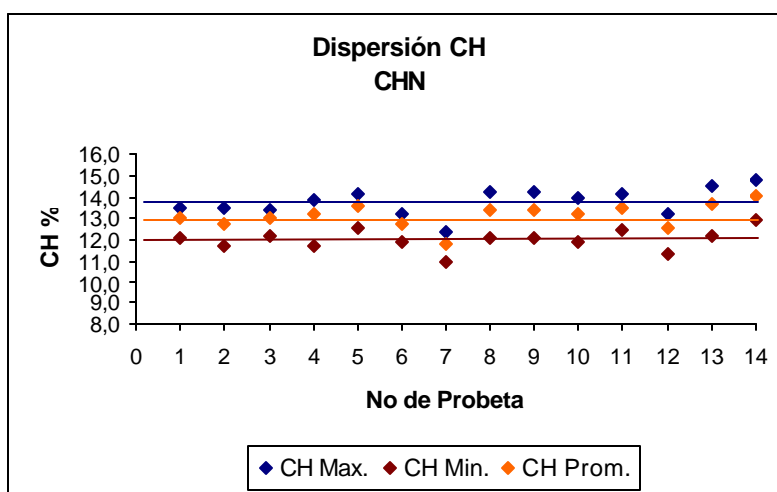
En los resultados se observó una mayor absorción de humedad para las probetas sin nudo. Se observó la influencia del clima en el contenido de humedad de la guadua, sin embargo la variación presentada no se sale de los rangos recomendados (Ver Sección 1.2.4). Al manejar la guadua en forma laminada se disminuye más su contenido de humedad que en estado rollizo. La guadua en estado rollizo presenta un contenido de humedad de 22.2% para las secciones sin nudo y 20.5% para las secciones con nudo<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> GABRIELE, José Y HERRERA, Hernán. Parámetros de Diseño de Elementos de Guadua Cultivada en el Municipio de Aratoca, Santander. Universidad Industrial de Santander, 2004.

Tabla4. Contenido de humedad CHN

| Probeta CHN       | CH % Max | CH % Min | CH % Prom |
|-------------------|----------|----------|-----------|
| 1                 | 13.5     | 12.1     | 13.0      |
| 2                 | 13.4     | 11.7     | 12.7      |
| 3                 | 13.4     | 12.2     | 13.0      |
| 4                 | 13.9     | 11.7     | 13.2      |
| 5                 | 14.2     | 12.6     | 13.5      |
| 6                 | 13.2     | 11.9     | 12.7      |
| 7                 | 12.4     | 11.0     | 11.8      |
| 8                 | 14.2     | 12.1     | 13.4      |
| 9                 | 14.3     | 12.1     | 13.4      |
| 10                | 14.0     | 11.9     | 13.2      |
| 11                | 14.1     | 12.5     | 13.5      |
| 12                | 13.2     | 11.3     | 12.5      |
| 13                | 14.5     | 12.2     | 13.7      |
| 14                | 14.8     | 13.0     | 14.1      |
| <b>Promedio</b>   | 13.8     | 12.0     | 13.1      |
| <b>Desviación</b> | 0.6      | 0.5      | 0.6       |

Gráfica 4. Dispersión Contenido de Humedad CHN



**3.2.2 Densidad** En los datos de densidad se observa gran dispersión entre las probetas (Ver gráficas 5 y 6).

De las probetas sin nudo (PCH) la máxima densidad seca al aire (Ds) fue de 0.756 gr/cm<sup>3</sup> y la mínima Ds de 0.361 gr/cm<sup>3</sup>, donde el promedio obtenido fue de 0.573 gr/cm<sup>3</sup>; para la densidad anhidra (Da) el máximo registro fue de 0.670 gr/cm<sup>3</sup>, la mínima Da de 0.316 gr/cm<sup>3</sup> y el promedio de 0.506 gr/cm<sup>3</sup>. (Ver tabla 5). De las

probetas con nudo la máxima densidad seca al aire (Ds) fue de 0.935gr/cm<sup>3</sup> y la mínima Ds de 0.535 gr/cm<sup>3</sup>, donde el promedio obtenido fue de 0.664 gr/cm<sup>3</sup>; para la densidad anhidra (Da) el máximo registro fue de 0.828 gr/cm<sup>3</sup>, la mínima Da de 0.472 gr/cm<sup>3</sup> y el promedio de 0.587 gr/cm<sup>3</sup>. (Ver tablas 5 y 6).

Tabla 5. Densidades PCH

| Probeta PCH       | Ds gr/cm3 | Da gr/cm3 |
|-------------------|-----------|-----------|
| 1                 | 0.523     | 0.458     |
| 2                 | 0.694     | 0.620     |
| 3                 | 0.361     | 0.316     |
| 4                 | 0.564     | 0.498     |
| 5                 | 0.656     | 0.579     |
| 6                 | 0.486     | 0.426     |
| 7                 | 0.639     | 0.566     |
| 8                 | 0.531     | 0.471     |
| 9                 | 0.742     | 0.656     |
| 10                | 0.489     | 0.429     |
| 11                | 0.442     | 0.389     |
| 12                | 0.756     | 0.670     |
| 13                | 0.596     | 0.528     |
| 14                | 0.541     | 0.475     |
| <b>Promedio</b>   | 0.573     | 0.506     |
| <b>Desviación</b> | 0.114     | 0.103     |

Gráfica 5. Dispersión de densidades PCH

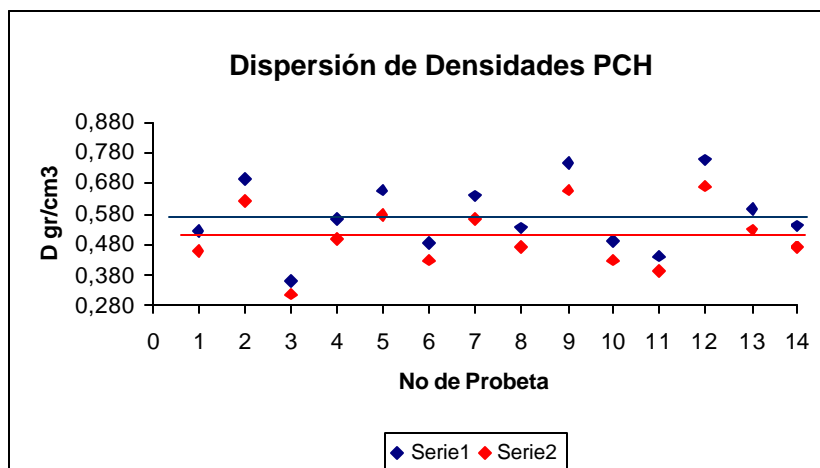
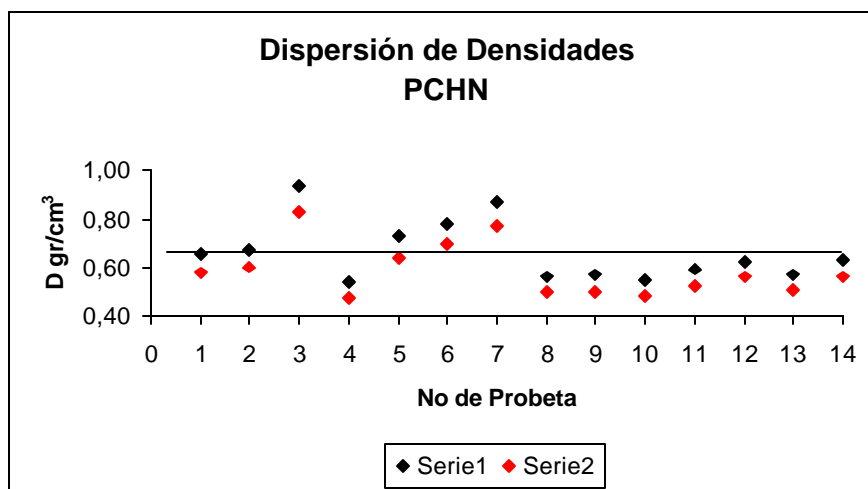


Tabla 6. Densidades CHN

| Probeta CHN       | Ds gr/cm <sup>3</sup> | Da gr/cm <sup>3</sup> |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                 | 0.656                 | 0.580                 |
| 2                 | 0.676                 | 0.600                 |
| 3                 | 0.935                 | 0.828                 |
| 4                 | 0.535                 | 0.472                 |
| 5                 | 0.733                 | 0.645                 |
| 6                 | 0.785                 | 0.696                 |
| 7                 | 0.866                 | 0.774                 |
| 8                 | 0.562                 | 0.495                 |
| 9                 | 0.568                 | 0.501                 |
| 10                | 0.548                 | 0.484                 |
| 11                | 0.594                 | 0.524                 |
| 12                | 0.630                 | 0.560                 |
| 13                | 0.571                 | 0.502                 |
| 14                | 0.639                 | 0.560                 |
| <b>Promedio</b>   | 0.664                 | 0.587                 |
| <b>Desviación</b> | 0.124                 | 0.111                 |

Gráfica 6. Dispersión de densidades CHN



### 3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

**3.3.1 Ensayo De Compresión** Los ensayos de compresión están definidos en tres tipos:

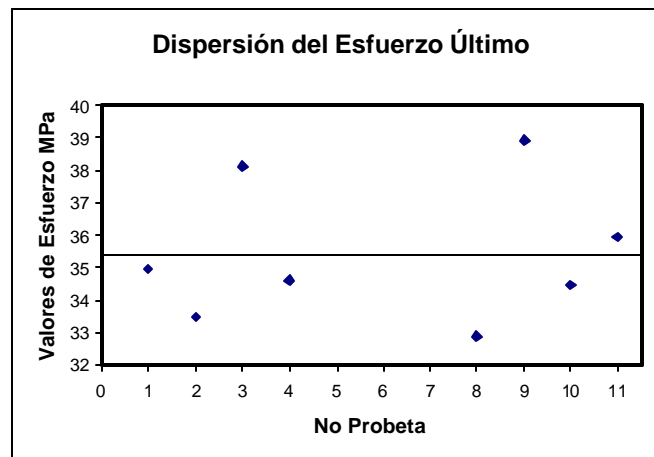
- **Compresión paralela** Los resultados obtenidos para compresión paralela se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Esfuerzos y Deformaciones Máximas a Compresión Paralela

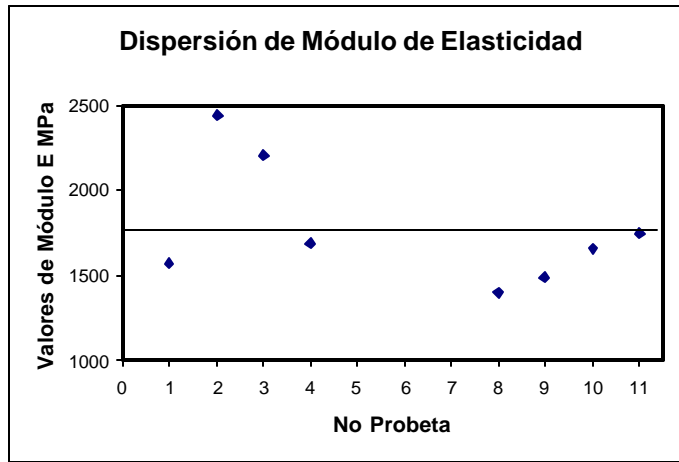
| PCP No            | sfalla Mpa | ? unit. | E Mpa   |
|-------------------|------------|---------|---------|
| 1                 | 34,98      | 0,04    | 1579,20 |
| 2                 | 33,48      | 0,03    | 2438,30 |
| 3                 | 38,14      | 0,03    | 2204,40 |
| 4                 | 34,63      | 0,04    | 1692,80 |
| 8                 | 32,88      | 0,04    | 1397,40 |
| 9                 | 38,91      | 0,03    | 1487,70 |
| 10                | 34,45      | 0,03    | 1662,10 |
| 11                | 35,93      | 0,05    | 1754,40 |
| <b>Promedio</b>   | 35,42      | 0,03    | 1777,04 |
| <b>Desviación</b> | 2,13       | 0,01    | 360,10  |

La resistencia última promedio a la compresión paralela a la fibra del laminado fue de 35.42 MPa con una desviación de 2.13 MPa. El promedio del módulo de elasticidad fue de 1777.04 con una desviación de 360 MPa. En la gráfica 8 se observa que el módulo de elasticidad de la probeta número 2 tiene un comportamiento diferente a las demás probetas aumentando el promedio del módulo de elasticidad y el valor de la desviación.

Gráfica 7. Esfuerzos máximos en Compresión Paralela

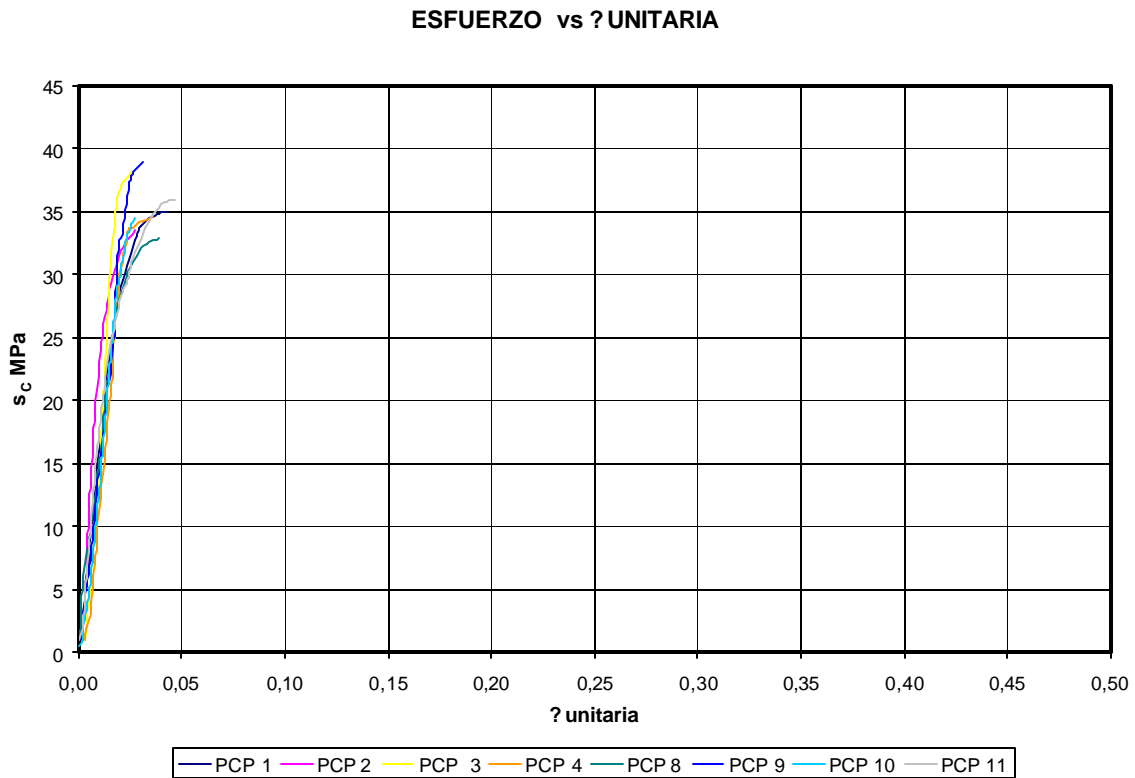


Gráfica 8. Módulos de Elasticidad máximos en Compresión Paralela



La gráfica 9 muestra los esfuerzos versus la deformación unitaria de las 8 probetas de compresión paralela.

Gráfica 9. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Paralela



El tipo de falla observado en las probetas está caracterizada por una línea en sentido transversal en la parte superior de la probeta (Ver fotografía 11)

Fotografía 11. Falla Tipo en Compresión paralela



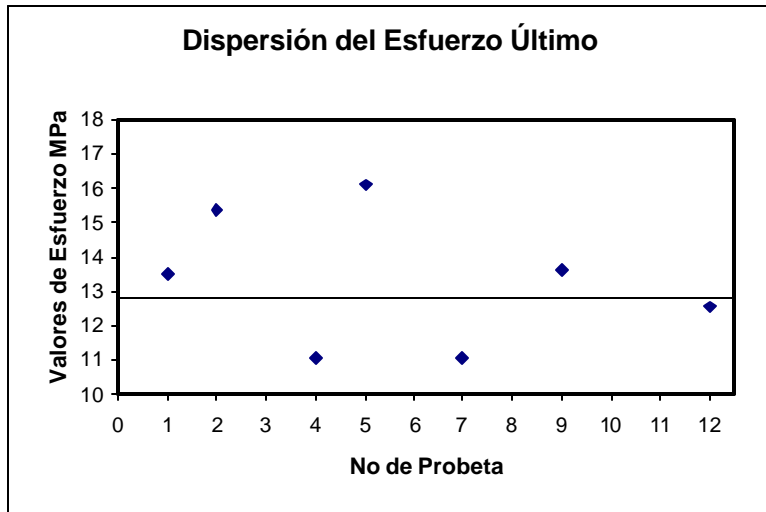
- **Compresión perpendicular** Los resultados obtenidos para compresión perpendicular se muestran en la Tabla 8.

La resistencia última promedio a la compresión perpendicular a la fibra del laminado fue de 12.9 MPa con una desviación de 2.18 Mpa.

Tabla 8. Datos de  $\sigma_c$ ,  $\sigma_{sc}$ ,  $\sigma_{c,ult}$ . PCPP

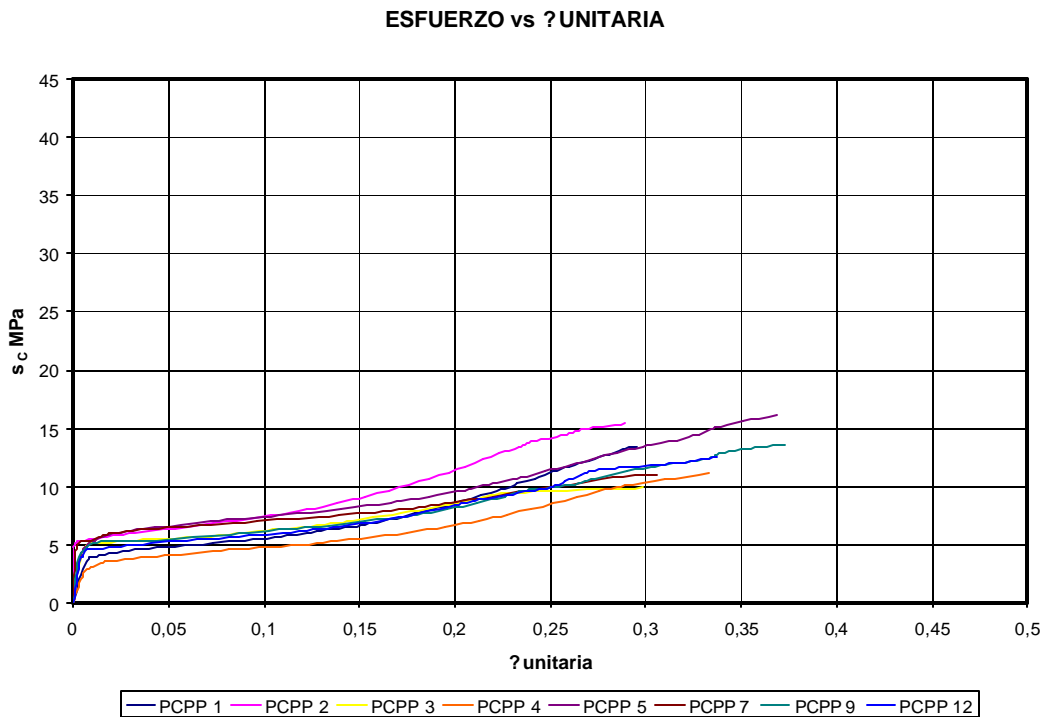
| PCPP No           | $\sigma_c$ falla MPa | $\sigma_{c,ult}$ unit. |
|-------------------|----------------------|------------------------|
| 1                 | 13,48                | 0,296                  |
| 2                 | 15,40                | 0,290                  |
| 3                 | 9,90                 | 0,299                  |
| 4                 | 11,07                | 0,333                  |
| 5                 | 16,11                | 0,369                  |
| 7                 | 11,06                | 0,306                  |
| 9                 | 13,63                | 0,373                  |
| 12                | 12,54                | 0,338                  |
| <b>Promedio</b>   | 12,90                | 0,325                  |
| <b>Desviación</b> | 2,18                 | 0,033                  |

Gráfica 10. Dispersión de Esfuerzos



La gráfica 11 muestra los esfuerzos versus la deformación unitaria de las 8 probetas de compresión perpendicular.

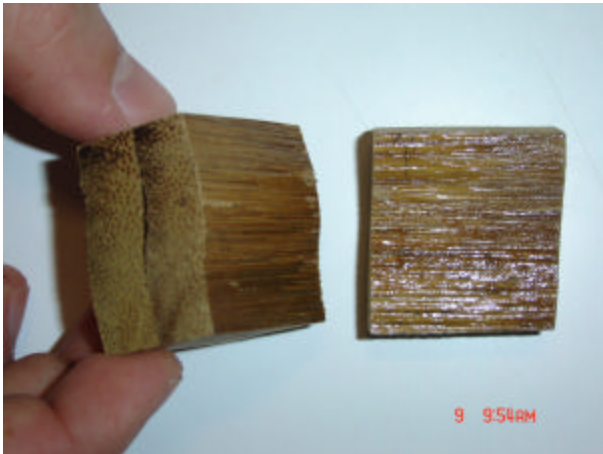
Gráfica 11. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Perpendicular



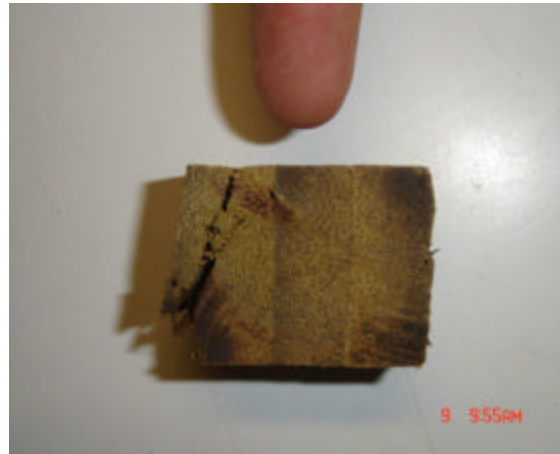
En el ensayo se observaron dos tipos de falla:

- Falla del adhesivo: Los esfuerzos se concentraron en la línea del encolado, fallando el adhesivo. Fotografía 12.
- Falla en la guadua: Las láminas exteriores de las probetas fallan, separándose las fibras a lo largo de una línea en sentido diagonal. Fotografía 13.

Fotografía 12. Falla de adhesivo en PCPP

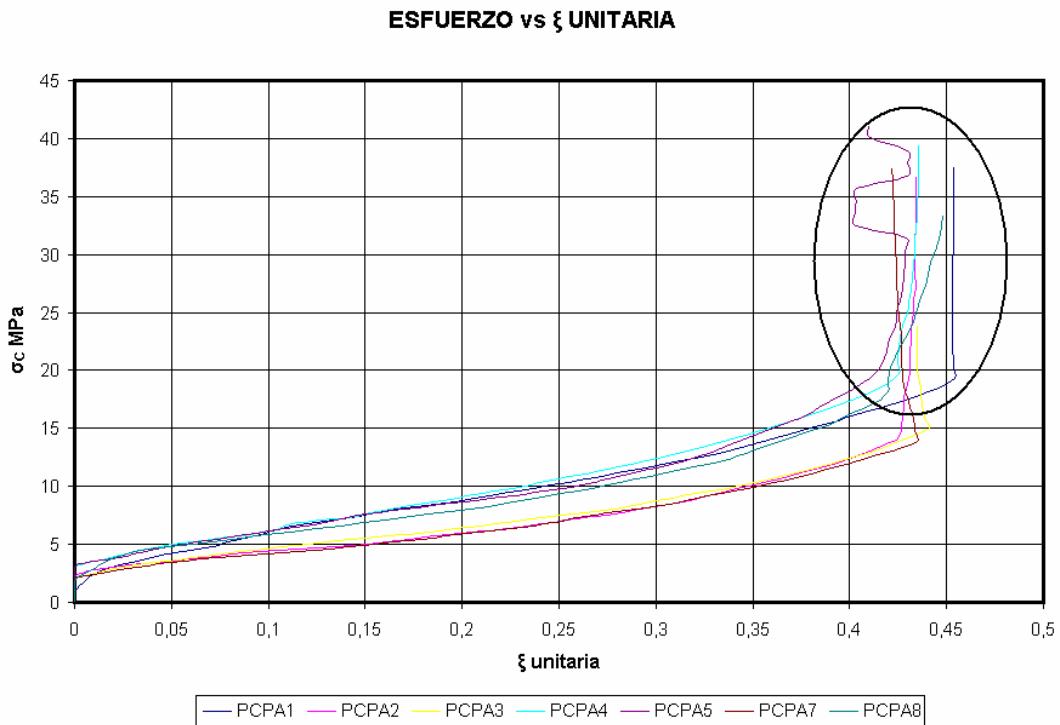


Fotografía 13. Falla de guadua en PCPP



- **Compresión perpendicular por aplastamiento** En la gráfica 12 se presenta el comportamiento de las probetas sometidas a compresión perpendicular por aplastamiento. Se observa que las probetas al llegar a una deformación unitaria promedio de 0.43 resistía carga sin deformarse (Zona dentro del círculo), esto sucede por el grado de compactación de las fibras producido por el excesivo aplastamiento, sin embargo las probetas ya habían fallado. Este ensayo se suspendió antes de llegar a los 4000 Kg permitidos por la máquina Universal para maderas Amsler (Ver Anexo A). La carga máxima representativa para este tipo de compresión se tomó en el punto de falla observado en la grafica 13. Los resultados obtenidos para compresión perpendicular por aplastamiento se muestran en la Tabla 9.

Gráfica12. Comportamiento de las probetas PCPA con sobre carga



Gráfica13. Esfuerzo vs Deformación para Compresión Perpendicular por aplastamiento

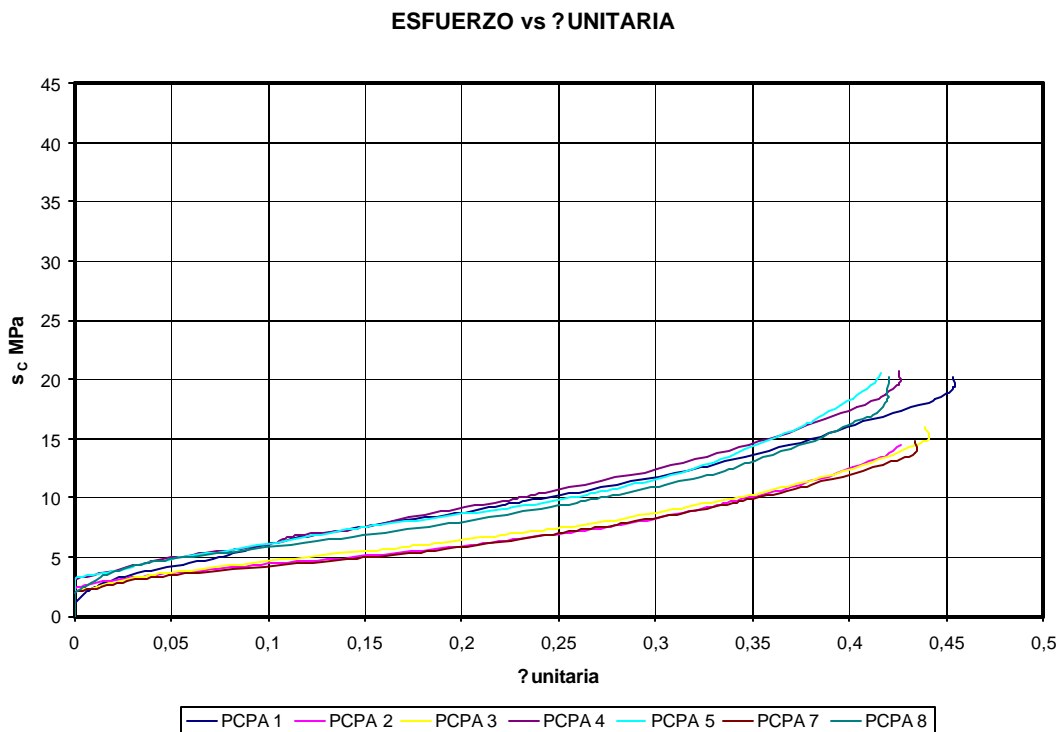
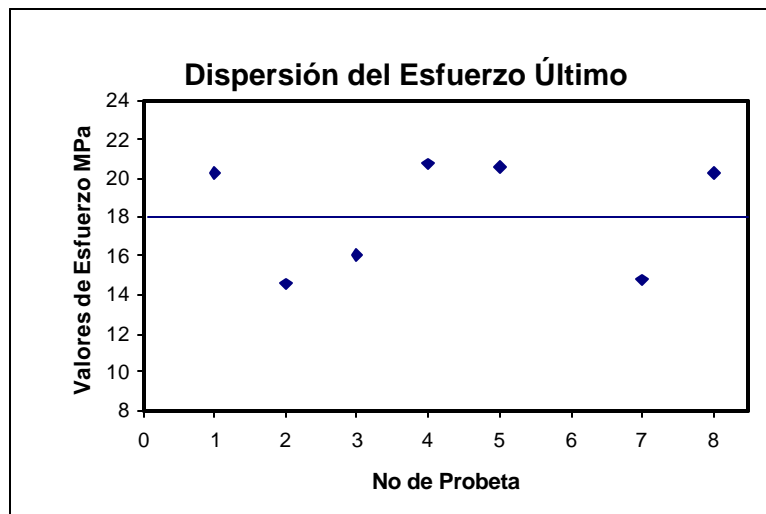


Tabla 9. Datos de sc, ?unt. PCPA

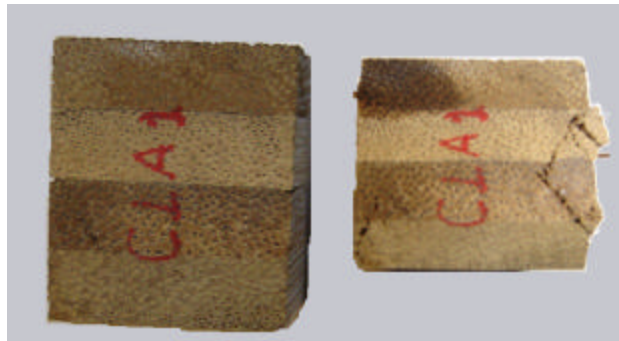
| PCPA No           | s falla MPa | ? unit. |
|-------------------|-------------|---------|
| 1                 | 20,25       | 0,453   |
| 2                 | 14,51       | 0,426   |
| 3                 | 15,97       | 0,439   |
| 4                 | 20,75       | 0,425   |
| 5                 | 20,56       | 0,417   |
| 7                 | 14,79       | 0,433   |
| 8                 | 20,22       | 0,421   |
| <b>Promedio</b>   | 18,15       | 0,431   |
| <b>Desviación</b> | 2,90        | 0,012   |

Gráfica14. Esfuerzos máximos en PCPA



La resistencia última promedio a la compresión perpendicular a la fibra del laminado fue de 18.15 MPa con una desviación de 2.90 MPa. El tipo de falla observada en la probeta corresponde a una rotura de fibras a lo largo de líneas orientadas diagonalmente. Ver fotografía 14.

Fotografía 14. Falla por aplastamiento



En el tabla 10 se muestra los esfuerzos últimos y la deformación unitaria para cada tipo de compresión analizada. Se observa un mejor comportamiento en la compresión paralela.

Tabla 10. Esfuerzo Último y Deformación Unitaria a Compresión

| Orientación de la fibra     | $s_{c\text{ult}}$ Mpa | ? unit. |
|-----------------------------|-----------------------|---------|
| Paralela                    | 35,40                 | 0,0346  |
| Perpendicular               | 12,90                 | 0,3254  |
| Perpendicular Aplastamiento | 18,15                 | 0,4305  |

**3.3.2 Ensayo de Tracción** Los resultados para este ensayo se consignan en la tabla 11

Tabla 11. Valores de Esfuerzo para Tracción

| PTP No            | $s_{\text{ult}}$ MPA |
|-------------------|----------------------|
| 1                 | 74,19                |
| 2                 | 99,00                |
| 3                 | 96,20                |
| 4                 | 94,47                |
| 5                 | 107,40               |
| <b>Promedio</b>   | 94,25                |
| <b>Desviación</b> | 12,26                |

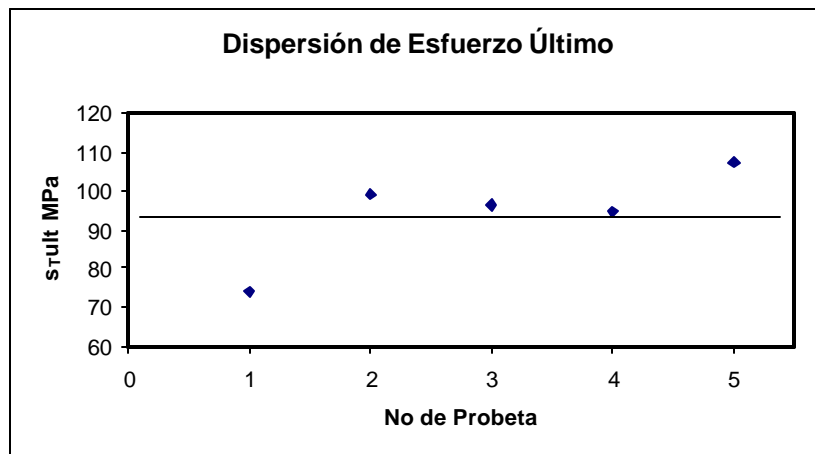
La resistencia última promedio a la tracción paralela a la fibra del laminado fue de 94.25 MPa con una desviación de 12.26 MPa.

El tipo de falla observada corresponde a una rotura de fibras en la garganta de la probeta (Ver fotografía 15). Se observó que las láminas con nudo en la garganta fallaban primero, las láminas sin nudo seguían soportando la carga hasta la rotura total de toda la sección de laminado.

Fotografía 15. Falla por tracción



Gráfica 15. Dispersión de Esfuerzos para Tracción



Los resultados obtenidos para las probetas de tracción para el laminado evidencian una resistencia mayor que para secciones de láminas con nudo, pero menores que para secciones de lámina sin nudo. En la tabla 12 se recopilaron datos de los esfuerzos últimos y los esfuerzos admisibles a tracción de láminas de guadua. En las dos primeras casillas corresponden a guadua proveniente del municipio de Aratoca en Santander.

Tabla 12. Esfuerzo a Tracción para láminas de guadua

| Lámina        | s <sub>ult</sub> MPA | s <sub>adm</sub> MPA |
|---------------|----------------------|----------------------|
| Cepa Sin Nodo | 250,56               | 130,73               |
| Cepa Con Nodo | 50,96                | 26,59                |

Fuente: Parámetros de Diseño de Elementos de Guadua Cultivada en el Municipio de Aratocha, Santander.<sup>15</sup>

**3.3.3 Ensayo de Flexión** Para evaluar esta propiedad se elaboraron dos tipos de ensayos:

- **Flexión con láminas verticales** Los resultados obtenidos para este tipo de flexión están consignados en la Tabla 13.

EL esfuerzo último a flexión promedio para laminado orientado verticalmente fue 92.72 MPa con una desviación de 5.71 MPa. El promedio del módulo de elasticidad fue de 10465.28 MPa con una desviación de 2.652MPa. El tipo de falla observado para la flexión vertical fue rotura de fibras en la parte inferior de la sección de la probeta (Ver fotografía 16)

Tabla 13. Valores para Flexión en PFV

| PFV No    | Pmax KN | ?max (cm) | Plp (KN)          | ?lp (cm) | s <sub>Bult</sub> Mpa | E Mpa    |
|-----------|---------|-----------|-------------------|----------|-----------------------|----------|
| 1         | 0.05    | 18.796    | 3.60              | 0.401    | 94.26                 | 8798.70  |
| 2         | 0.05    | 21.590    | 2.60              | 0.376    | 95.34                 | 7326.66  |
| 3         | 0.04    | 10.668    | 3.00              | 0.221    | 87.77                 | 13627.75 |
| 4         | 0.05    | 9.398     | 2.80              | 0.198    | 95.34                 | 13951.37 |
| 5         | 0.04    | 11.176    | 2.60              | 0.213    | 82.80                 | 11587.00 |
| 6         | 0.05    | 9.906     | 3.60              | 0.351    | 93.28                 | 9927.58  |
| 9         | 4.50    | 20.320    | 3,60              | 0,472    | 100,21                | 8037,99  |
| Luz= 30cm |         |           | <b>Promedio</b>   |          | 92.72                 | 10465.29 |
|           |         |           | <b>Desviación</b> |          | 5.71                  | 2652.72  |

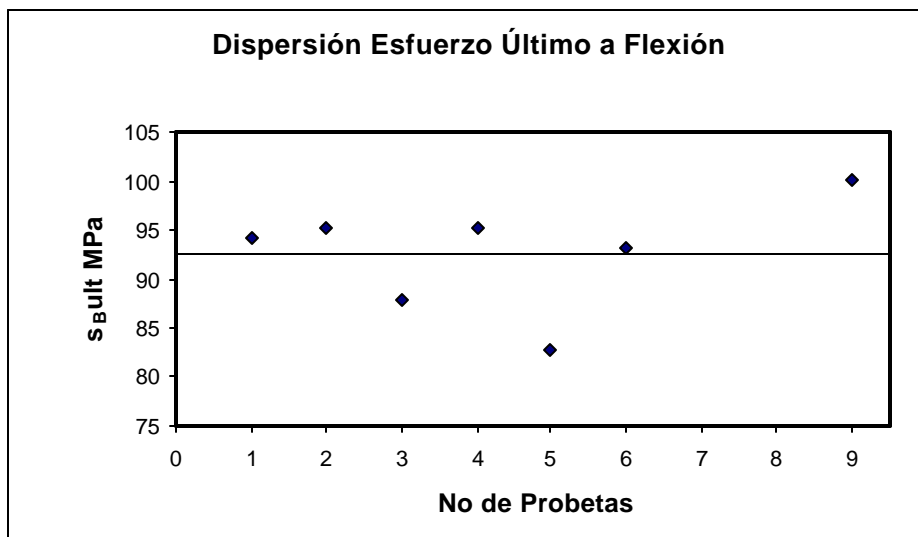
<sup>15</sup> GABRIELE, José Y HERRERA, Hernán. O.p., Cit , pag. 36

Fotografía 16. Falla en flexión laminado vertical

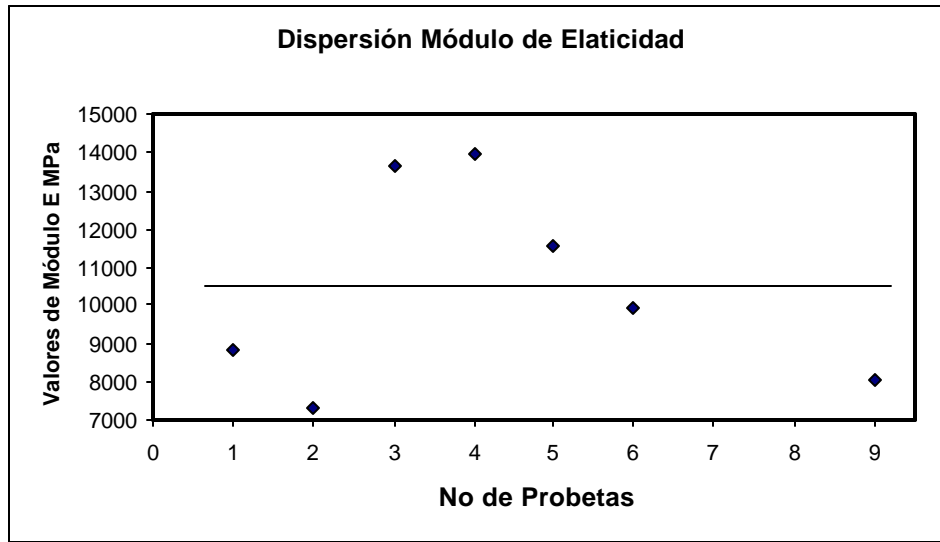


En las gráficas 16 y 17 se muestran las dispersiones y promedio de esfuerzo último a flexión y módulo de elasticidad respectivamente para las probetas de flexión de laminado vertical.

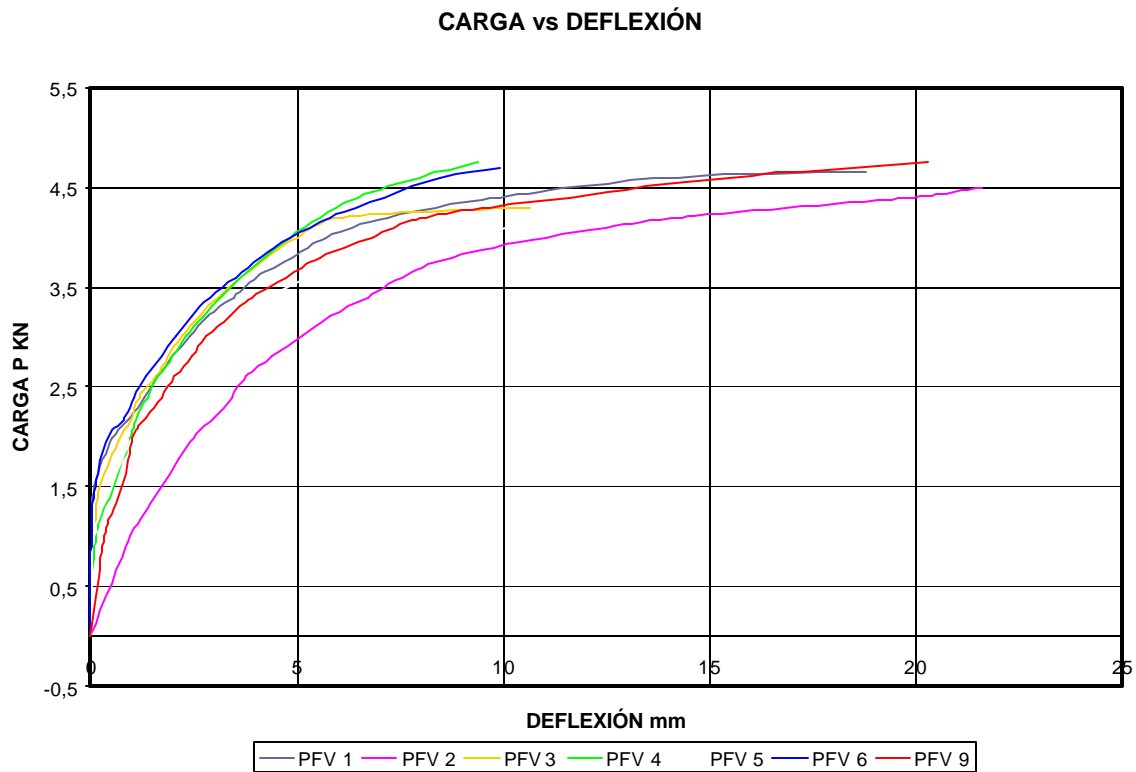
Gráfica 16. Dispersión Esfuerzo Último a Flexión en PFV



Gráfica 17. Dispersión Módulos de Elasticidad en PFV



Gráfica 18. Carga vs Deflexión para Flexión con láminas verticales



- **Flexión con Láminas Horizontales** Los resultados obtenidos para este tipo de flexión están consignados en la Tabla 14.

EL esfuerzo último a flexión promedio para laminado orientado horizontalmente fue 76.73 MPa con una desviación de 6.51 MPa. El promedio del módulo de elasticidad fue de 5450.1 MPa con una desviación de 1212.15 MPa.

En el ensayo se observó dos tipos de fallas:

- Fallas en el adhesivo: Se observó separación de las láminas fallando por cortante el adhesivo (Ver fotografía 17).
- Falla en la guadua: Se observó rotura de las fibras la guadua sometida a tracción. (Ver fotografía 18).

Fotografía 17. Falla a cortante en PFH



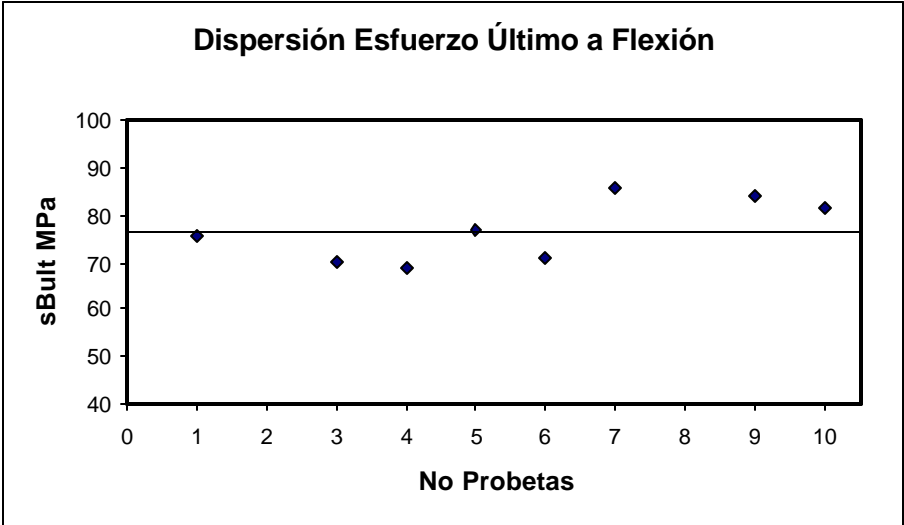
Fotografía 18. Falla en la guadua en PFH



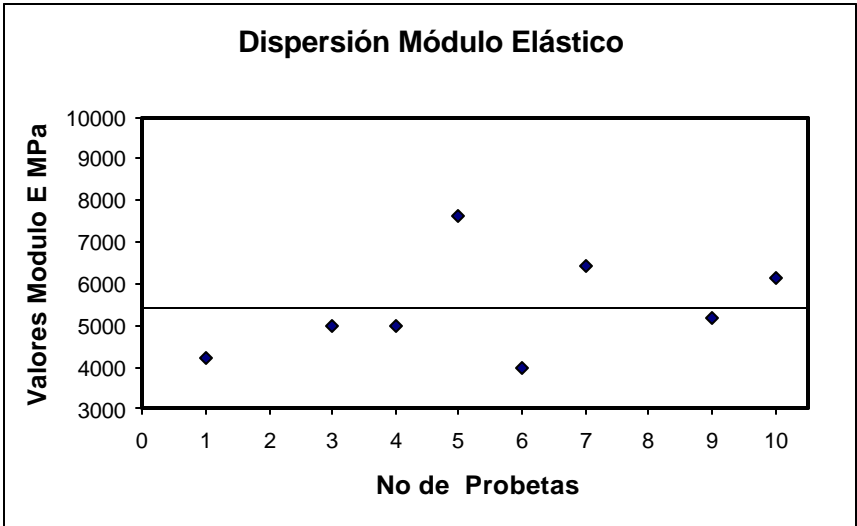
Tabla 14. Valores para Flexión en PFH

| PFV No    | Pmax Kg | ?max (cm) | Plp (Kg)          | ?lp (cm) | s <sub>Bult</sub> Mpa | E Mpa   |
|-----------|---------|-----------|-------------------|----------|-----------------------|---------|
| 1         | 4,20    | 12,040    | 3,00              | 0,594    | 75,48                 | 4238,91 |
| 3         | 3,95    | 11,786    | 3,00              | 0,503    | 70,19                 | 5015,89 |
| 4         | 4,00    | 7,798     | 3,40              | 0,551    | 68,83                 | 4990,96 |
| 5         | 4,40    | 10,922    | 2,60              | 0,279    | 77,04                 | 7637,08 |
| 6         | 4,30    | 25,908    | 2,80              | 0,544    | 71,04                 | 3989,17 |
| 7         | 5,10    | 14,478    | 3,60              | 0,442    | 85,75                 | 6440,14 |
| 9         | 5,10    | 20,879    | 3,80              | 0,554    | 83,98                 | 5168,23 |
| 10        | 4,80    | 10,135    | 2,60              | 0,340    | 81,53                 | 6120,06 |
| Luz= 30cm |         |           | <b>Promedio</b>   |          | 76,73                 | 5450,06 |
|           |         |           | <b>Desviación</b> |          | 6,51                  | 1212,55 |

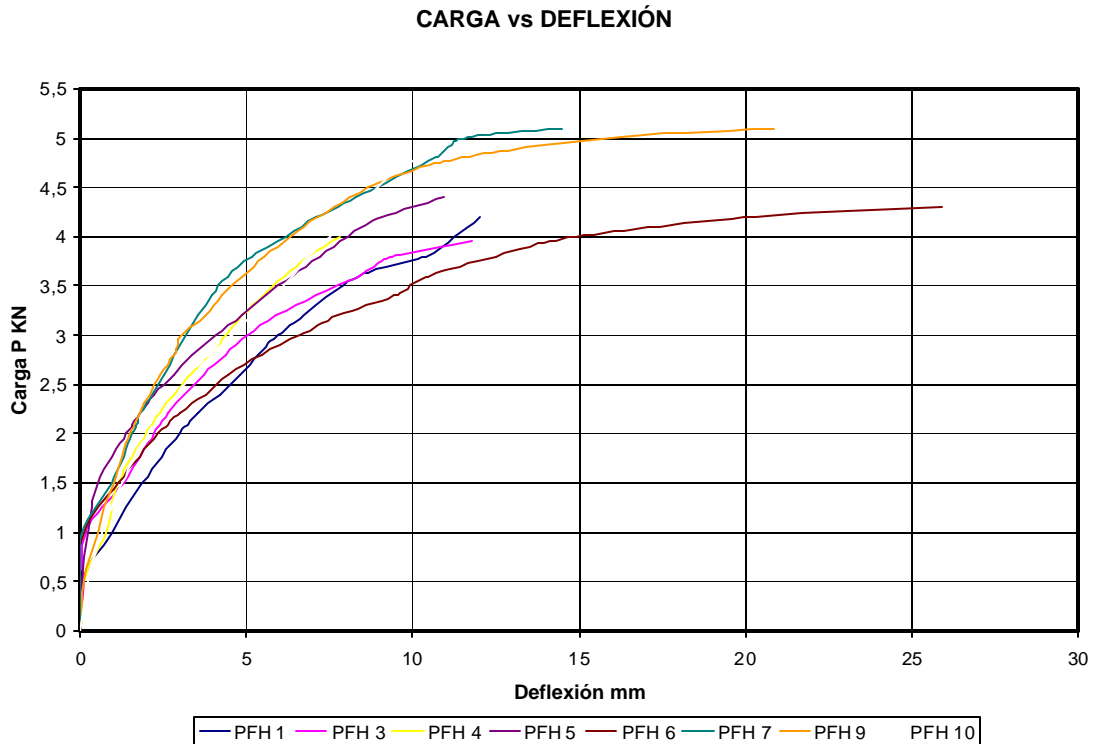
Gráfica 19. Dispersión Esfuerzo Último a Flexión en PFH



Gráfica 20. Dispersión Módulo Elástico en PFH



Gráfica 21. Carga vs Deflexión para Flexión con láminas horizontales



En el tabla 15 se muestra los esfuerzos últimos y los módulos de elasticidad para cada tipo de flexión analizada. Se observa un mejor comportamiento en la flexión con lámina orientada verticalmente.

Tabla 15. Esfuerzos últimos y Módulos de Elasticidad para Flexión

| Orientación de la Lámina | $s_{Bult}$ Mpa | E MPa   |
|--------------------------|----------------|---------|
| Vertical                 | 92,71          | 10465,3 |
| Horizontal               | 76,73          | 5450,06 |

### 3.4 COMPARACIÓN MECÁNICA DEL LAMINADO CON MADERAS COMERCIALES

En la tabla 16 se recopilieron los datos de la resistencia última para las diferentes solicitudes de esfuerzo, del laminado de guadua y de varios especies de maderas

típicas en Santander. El esfuerzo a flexión del laminado de guadua corresponde al comportamiento de la lámina configurada verticalmente. Los datos de los esfuerzos últimos de las especies de maderas se tomaron del proyecto de grado Parámetros de Diseño de Elementos de Guadua Cultivada en el Municipio de Aratoca, Santander<sup>16</sup>.

Tabla 16. Cuadro comparativo de esfuerzos últimos para varias especies

| Especie                   | Tracción           | Compresión         | Flexión            |         |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
|                           | s <sub>T</sub> Mpa | s <sub>C</sub> Mpa | s <sub>B</sub> Mpa | E Mpa   |
| <i>Laminado de Guadua</i> | 94,25              | 35,42              | 92,72              | 10465,3 |
| Abarco                    | 85,95              | 43,70              | 101,06             | 18970   |
| Aceitemaria               | 64,07              | 51,58              | 95,05              | 16000   |
| Canelo                    | 75,67              | 51,28              | 89,10              | 12450   |
| Caracoli                  | 20,23              | 23,51              | 35,76              | 5800    |
| Sapan                     | 97,08              | 93,96              | 190,48             | 12200   |
| Tolua                     | 42,19              | 29,19              | 58,70              | 13000   |

De las especies reseñadas en la tabla 16, el sapan tiene el mejor comportamiento mecánico. El laminado de guadua presenta un buen comportamiento a tracción, superado únicamente por el sapan. El resistencia a flexión ofrecida por el laminado de guadua es parecida a la del Abarco, Aceitamaria, Canelo, superior a la del Caracolí y la Tulúa. La resistencia a compresión del laminado de guadua está entre los valores bajos de la tabla superando únicamente al Caracolí y la Tulúa.

---

<sup>16</sup> Ibid., pag. 49

## 4. PROPUESTA DE ELEMENTO

En esta investigación se proponen elementos viga y elementos columnas, bases del sistema estructural aporricado e igualmente utilizados en otros sistemas. Los elementos fueron ensayados, analizando los factores predominantes del diseño y el tipo de fallas presentados.

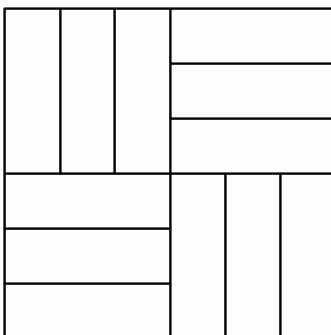
### 4.1 COLUMNA

Las columnas son elementos cuya sollicitud principal es a compresión.

#### 4.1.1 Características del Ensayo y del Espécimen

- *Dirección de la Fibra* Analizando los resultados obtenidos en los ensayos de las probetas de compresión para las diferentes direcciones de la fibra se observó un mejor comportamiento desde el punto de vista de resistencia última y deformación unitaria cuando la sollicitud se hace paralela a la fibra PCP. (Ver tabla 7)
- *Configuración* La configuración de las láminas se hizo en diferentes direcciones basándose en la configuración para baldosa evitando así inducir líneas de fallas en la columna. (Ver figura 11)
- *Dimensión* Las dimensiones de las columnas por facilidad constructiva y limitación del material se escogieron de 6cm x 6cm y la altura de 20 cm guardando las proporciones recomendadas por la normas NTC784 y NTC785 (Ver Anexo C).

Figura 11. Configuración de Sección Columna



Fuente: Manual de Construcción con Bambú<sup>17</sup>

- *Ensayo* El ensayo se basó en la norma ASTM D198. Los especímenes se cargaron a compresión en la Máquina Universal de Ensayos Marca Trebel con la escala de carga máxima de 20 Toneladas tomando las lecturas de carga y deformación en los intervalos que se creyeron convenientes durante el ensayo. Se llevó el espécimen a la rotura con el objetivo de analizar el proceso de falla y el comportamiento del modelo.
- *Cantidad* La cantidad de especímenes ensayados es cinco.

Fotografía 19. Columnas del ensayo.



<sup>17</sup> HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Manual de construcción con bambú. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

#### 4.1.2 Descripción de las Fallas

- *Columna 1* En el ensayo se observó inicialmente una línea de falla en el sentido transversal en la parte superior de la columna fraccionando esta en dos (Ver fotografía 20), seguido del desprendimiento de los módulos en la parte inferior, desgarramiento de las fibras de las láminas en el sentido longitudinal, el bloque por encima de la falla transversal se incrustó entre la falla inferior y finalmente se formó una línea tenue de falla transversal en la base de la columna.

Fotografía 20. Columna 1 Fallada



- *Columna 2* En el ensayo se observó un pequeño pandeo en la columna. No se presentó el desprendimiento de módulos, aparecieron líneas de falla en el sentido transversal en la parte superior de la columna, con deslizamiento del bloque superior (Ver fotografía 21). En la parte inferior de la columna se observó una línea tenue de falla transversal, pero no se presentó deslizamiento del bloque.  
Al fabricar el espécimen la superficie normal de la columna no quedó totalmente plana induciendo pandeo sobre la columna.

Fotografía 21. Columna 2 Fallada



- *Columna 3* En el ensayo se observó una línea de falla transversal en la parte superior de la columna con deslizamiento del bloque superior, y falla transversal en la parte inferior sin deslizamiento del bloque. Se observó separación de los módulos y de algunas láminas, fallando el adhesivo (Ver fotografía 22)

Fotografía 22. Columna 3 Fallada



- *Columna 4* En el ensayo se observó desprendimiento de módulos, fallando inicialmente el adhesivo, esto se evidenció por la no continuidad de las

fallas transversales de un módulo a otro (Ver fotografía 23). Los esfuerzos se concentraron en la parte superior de la columna y con menor intensidad se observaron fallas en la parte inferior de la misma.

Fotografía 23. Columna 4 Fallada



- *Columna 5* En el ensayo no se observó desprendimiento de módulos, se presentó una línea de falla continua en el sentido transversal con deslizamiento del bloque superior (Ver fotografía 24).

Fotografía 24. Columna 5 Fallada

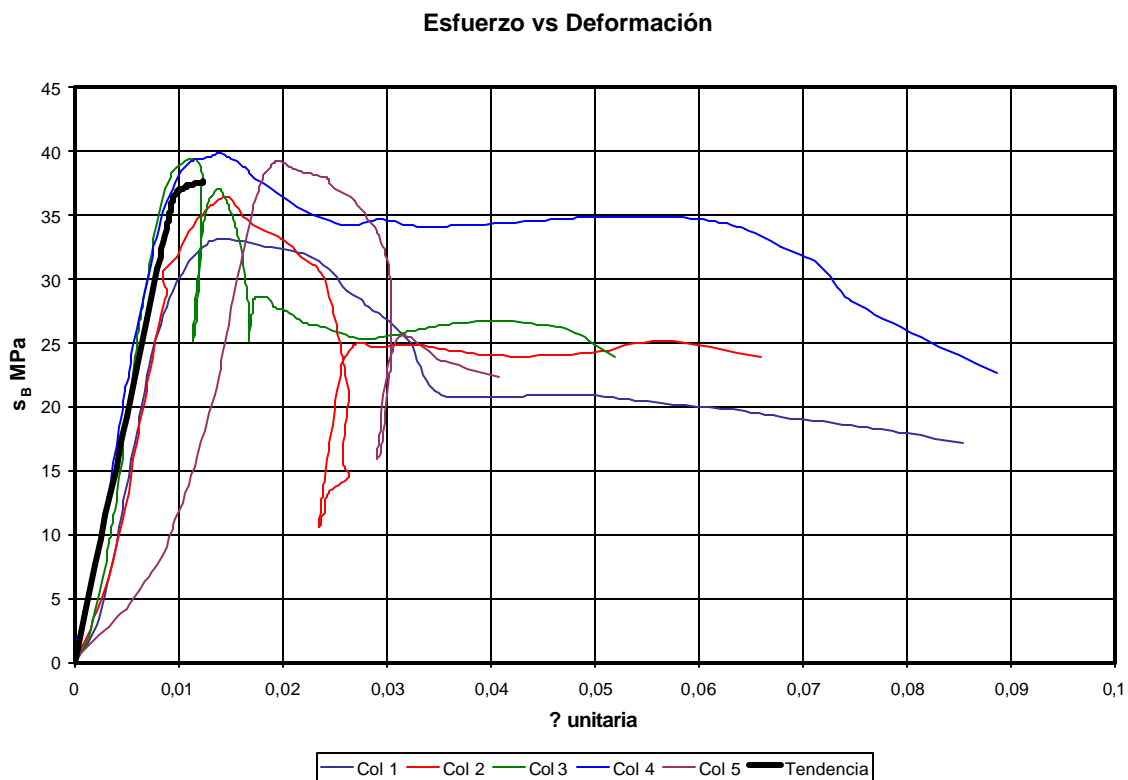


**4.1.3 Resultados** El módulo elástico de las columnas se obtuvo a partir de la pendiente de la línea de tendencia de la zona elástica que se identificó en la gráfica de Esfuerzo Vs Deformación Unitaria para cada una de las columnas (Ver Anexo E).

Tabla 17. Resultados Ensayos para las Columnas

| Especimen         | Pmax. KN | $s_c$ Mpa | $\epsilon$ unit. | E Mpa   |
|-------------------|----------|-----------|------------------|---------|
| 1                 | 125      | 33,05     | 0,01375          | 3477,20 |
| 2                 | 137,5    | 36,36     | 0,01480          | 3627,30 |
| 3                 | 149      | 39,40     | 0,01137          | 4912,10 |
| 4                 | 141      | 39,83     | 0,01378          | 4243,20 |
| 5                 | 141      | 39,18     | 0,01951          | 2924,70 |
| <b>Promedio</b>   |          | 37,56     | 0,01464          | 3836,90 |
| <b>Desviación</b> |          | 2,87      | 0,00300          | 762,65  |

Grafica 22. Esfuerzo vs Deformación para las Columnas



**4.1.4 Análisis de los Resultados** El promedio de los esfuerzos máximos que resistieron los modelos estuvieron por encima del promedio obtenido en los ensayos de las probetas PCP (Ver Tabla 7). El mínimo esfuerzo obtenido correspondió al espécimen uno con 33.05 MPa, el máximo esfuerzo correspondió al de el espécimen cuatro con 39.83 MPa, y el promedio fue de 37.57 MPa con una desviación estándar de 2.87 MPa.

Se observó un buen comportamiento en general de las columnas teniendo en cuenta que las fallas que se presentaron corresponde a la rotura típica de los elementos de madera sometidos a compresión, el adhesivo no fue crítico ya que el desprendimiento de los módulos y láminas se dio después de alcanzar la carga máxima cuando ya las láminas habían fallado.

En la gráfica 22 se puede observar las curvas esfuerzo vs deformaciones obtenidas de los ensayos a compresión para los especímenes, el comportamiento hasta la carga máxima es similar en todas las columnas, la línea negra muestra la tendencia de la zona elástica. Después de la carga máxima el comportamiento de las columnas varía de una a otra, observándose dos tipos de curva en esta sección. Para las columnas 2, 3 y 5 se evidencian en la curva cambios bruscos consistentes en disminución de la resistencia y luego aparente recuperación de la misma, se atribuye este comportamiento a las propiedades del laminado de guadua, donde su sección puede fallar por partes, sin una rotura total, aportando cada bloque una resistencia que permita carga después de la falla de alguno de los mismos. Para las columnas 1 y 4 se observa que después de la carga máxima la curva toma una pendiente negativa sin presentar zonas de carga y descarga. Para todas las columnas se interrumpió el ensayo sin llegar a la carga de ruptura, se observó un comportamiento dúctil donde el elemento se deformó después de llegar a la carga máxima. Para tal caso se tiene que el esfuerzo último es diferente al esfuerzo de ruptura.

## 4.2 VIGA

Las vigas son elementos cuya sollicitud principal es a flexión generando en las fibras esfuerzos de cortante, tracción y compresión.

### 4.2.1 Características del Ensayo y del Espécimen

- *Dirección de la Fibra* Los ensayos de flexión se realizaron utilizando probetas cuya dirección de la fibra era perpendicular a la carga. Para la elaboración de los elementos se usó de igual forma las fibras en dirección perpendicular a la carga.
- *Configuración* Analizando los resultados de los ensayos de flexión en las probetas PFV y PFH se puede observar un mejor comportamiento de las probetas PFV cuya configuración presenta láminas orientadas verticalmente, mayor resistencia con una deformación menor (Ver Sección 3.3.2). Fabricar vigas con secciones compuestas por láminas orientadas en sentido vertical u horizontal únicamente puede conducir a la inducción de líneas de fallas. La propuesta se configuró combinando láminas horizontales y verticales para obtener un mejor comportamiento, teniendo en cuenta que el promedio de la resistencia última de las probetas con las láminas orientadas horizontalmente corresponden al 82.3% de la resistencia última promedio de las probetas orientadas verticalmente, dando viabilidad al uso de las dos tipos de configuración. La sección está compuesta por tres módulos, los cuales están formados por varias láminas, configurados vertical u horizontalmente, teniendo entonces una sección LB1 (Ver figura 12) con módulos horizontales arriba y abajo y un módulo vertical en el centro, y otra sección LB2 (Ver figura 13) con módulos verticales arriba y abajo y un módulo horizontal en el centro.

Figura 12. Sección LB1

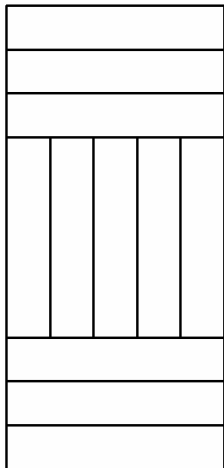
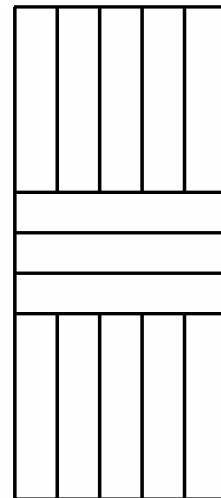


Figura 13. Sección LB2



- *Dimensión* Las dimensiones propuestas fueron de 3.5cm x 7.9 cm para la sección LB1 y de 3.5 cm x 8.8 cm para la sección LB2 y una luz libre de 1m (Ver Anexo C). La luz libre fue la mayor permitida por la máquina Universal de ensayos marca Trebel.
- *Empalmes longitudinales* Los empalmes longitudinales posibles a realizar con la maquinaria que se disponía eran a tope y en bisel plano (Ver figura1). Se escogió el empalme en bisel plano a 45° que ofrece mayor resistencia, gracias a su mayor área de contacto. Las uniones se ubicaron de tal forma que de un nivel a otro de laminados existiera una separación para no crear líneas de debilidad en el espécimen. Para el módulo inferior de la viga la unión no puede estar en la mitad de la luz, donde los esfuerzos de tracción inducidos por la carga son mayores.
- *Ensayo* El ensayo se basó en la norma ASTM D 143. Los modelos se fallaron a flexión cargados puntualmente en el centro de la luz libre en la Máquina Universal de ensayos Marca Trebel con la escala de carga máxima de 20 Toneladas. Para el ensayo se tomaron datos de carga y flecha en los intervalos que se creyeron convenientes. Los modelos se

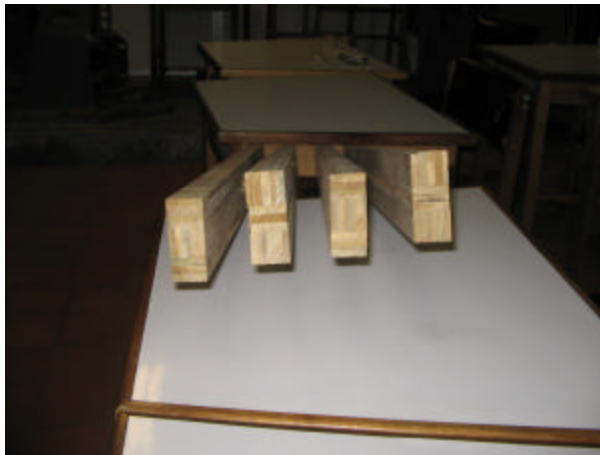
llevaron a la rotura con el objetivo de analizar el proceso de falla y el comportamiento del mismo.

Fotografía 25. Viga Cargada en la mitad de la luz



- *Cantidad* Se ensayaron dos especímenes por cada tipo de configuración debido a las limitaciones de material.

Fotografía 26. Vigas a Ensayar.



**4.2.2 Descripción de las Fallas** Para efectos de caracterización de las fallas, en el módulo orientado horizontalmente cada lámina corresponde a un nivel, enumerados de abajo hacia arriba.

- *Espécimen 1 Tipo LB1*

*Modulo inferior (Orientación Horizontal)* El módulo inferior se deslizó en el extremo derecho de la viga (Ver fotografía 27). En el nivel uno el empalme longitudinal se separó, generando desprendimiento de la lámina. El nivel dos no tuvo problemas en la unión, ni falla en la lámina. En el nivel tres se observó separación de la junta longitudinal, no se apreció fallas en la lámina.

*Modulo Central (Orientación Vertical)* Se observó separación de los empalmes longitudinales en los niveles exteriores y el central. En los otros dos niveles no se observó fallas.

*Modulo Superior (Orientación Horizontal)* Se observó aplastamiento causado por el rodillo de carga. El nivel uno no presentó fallas visibles. En el nivel dos hubo separación de las unión longitudinal y desprendimiento de la lámina. El nivel tres no presentó separación del empalme longitudinal, sin embargo se observó desgarramiento de la lámina a la altura de la unión del nivel dos.

Fotografía 27. Deslizamiento Módulo Inferior



Fotografía 28. Viga 1 fallada



Falla el adhesivo en el contacto de los módulos inferiores y centrales, deslizándose el módulo inferior en el extremo derecho de la viga (Ver fotografía 27). En general se observó esfuerzos concentrados hacia la parte izquierda de la viga ubicándose la mayoría de las fallas en el sector donde están los empalmes longitudinales (Ver fotografía 28)

- *Espécimen 2 Tipo LB1*

*Módulo Inferior (Orientación Horizontal)* En el nivel uno se separó la unión longitudinal, no se observó falla a tracción en las fibras. En el nivel dos no se presentaron falla de empalme longitudinal ni de lámina. En el nivel tres se observó separación de la unión longitudinal y falla de lámina por cortante paralelo a la fibra (Se observa dentro del círculo en la fotografía 29).

*Módulo Central (Orientación Vertical)* Se observó falla a tracción en el punto medio de la viga.

*Módulo Superior (Orientación Horizontal)* Se observó aplastamiento causado por el rodillo de carga, falla a compresión en el punto medio de la viga. En el nivel tres se observó separación del empalme longitudinal ocasionado por el aplastamiento producto del rodillo de carga.

Fotografía 29. Viga 2 Fallada



El módulo inferior falló, los módulos central y superior se comportaron como una viga haciendo que el eje neutro se subiera y el módulo central actúe a tracción.

- *Espécimen 3 Tipo LB2*

*Modulo Inferior (Orientación Vertical)* En los niveles internos se observó la separación de las uniones longitudinales. En los niveles externos no se observó separación de las uniones longitudinales, las láminas fallaron a tracción en el punto medio de la viga.

*Modulo Central. (Orientación Horizontal)* En el nivel uno se observó separación se la unión longitudinal, no se apreció fallas en las láminas. En el nivel dos y tres no se observó separación de las uniones longitudinales, las láminas fallaron a tracción en el punto medio de la viga.

*Módulo Superior (Orientación vertical)* El aplastamiento fue bastante notorio, afectó la lectura de la flecha tomada en el ensayo pues fue relativamente mayor al aplastamiento en las demás vigas.

Fotografía 30. Viga 3 Fallada



El módulo inferior sufrió separación de tres niveles disminuyendo la sección resistente, lo cual indujo la falla a tracción en las láminas que quedaron resistiendo todo el esfuerzo. El eje neutro se subió y el módulo central soportó los esfuerzos de tracción.

Al corregir los errores del prensado por medio de un cepillado se disminuyó la sección de los niveles externos del módulo inferior, que ante la sollicitación a tracción rápidamente fallaron.

- *Espécimen Cuatro Tipo LB2*

*Módulo Inferior (Orientación Vertical)* En los niveles internos se observó la separación de las uniones longitudinales. En los niveles externos no se observó separación de las uniones longitudinales, las láminas fallaron a tracción en el punto medio de la viga

*Módulo Central (Orientación Horizontal)* No se observó falla de ningún tipo.

*Módulo Superior (Orientación Vertical)* Presenta aplastamiento generado por la carga.

Fotografía 31. Viga 4 Fallada



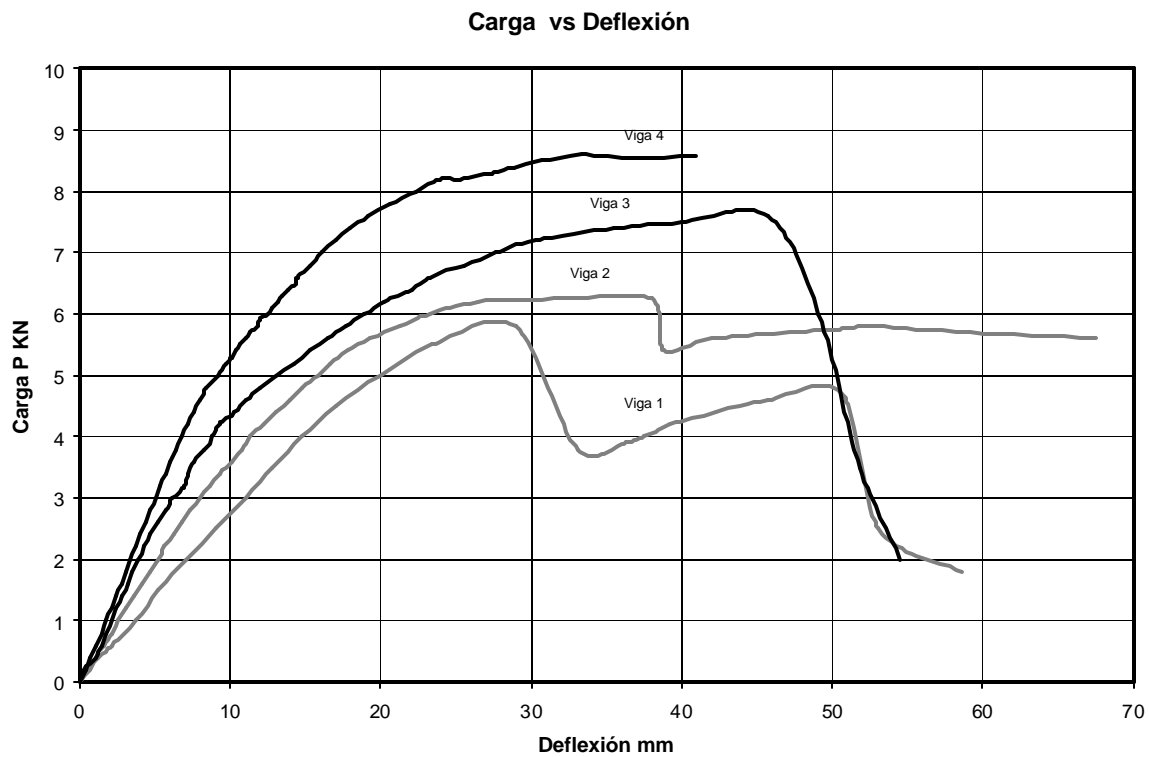
La viga no fue cargada hasta la rotura total como en los otros casos por tal motivo se observó que el módulo central y superior no sufrieron mayor daño.

**4.2.3 Resultados** Para procesar los datos se utilizó la misma metodología utilizada en los ensayos de las probetas PFH y PFV (Ver secciones 2.4.3 y 3.3.2).

Tabla 18. Resultados Ensayos para las Vigas

| PROPUESTA | VIGA | Pmax KN | $\delta_{max}$ (cm) | $s_B$ Ult (Mpa) | E (Mpa) |
|-----------|------|---------|---------------------|-----------------|---------|
| LB 1      | 1    | 5,80    | 28,96               | 39,83           | 3825,14 |
|           | 2    | 6,25    | 37,97               | 42,92           | 4980,37 |
| LB 2      | 3    | 7,60    | 45,72               | 46,16           | 5452,08 |
|           | 4    | 8,60    | 33,32               | 52,24           | 6424,99 |

Grafica 23. Carga vs Deflexión para las Vigas



**4.2.4 Análisis de los Resultados** Se obtuvo para el espécimen uno un esfuerzo último a flexión de 39.83 MPa para el espécimen dos 42.92 MPa para el espécimen tres 46.16 MPa para el espécimen cuatro 52.23 MPa. El módulo elástico para el espécimen uno fue de 3825.14 MPa, para el espécimen dos 4980.37 MPa, para el espécimen tres 5452.08 MPa, para el espécimen cuatro 6424.99 MPa.

En la gráfica 23 se observa el comportamiento de cada uno de los tipos de especímenes ensayados. Para LB1 (Ver figura 12) muestra que después de la carga máxima hay un leve descenso en la curva seguido de una pendiente positiva, indicando que el espécimen después de la falla soportó carga resistida por los módulos central y superior, comportándose estos como una nueva sección. El módulo central orientado verticalmente se comportó muy bien a tracción, evidenciado en el ascenso de la curva después de la falla. Para LB2 no se observó dicho ascenso debido a que el módulo central orientado horizontalmente no proporcionó la resistencia suficiente a tracción para provocar una pendiente positiva en la curva después de la falla.

Analizando los resultados obtenidos al fallar los especímenes y el tipo de falla presentada para cada caso se observó mejor comportamiento para las vigas tipo LB2. (Ver figura 13). Los especímenes evidenciaron debilidad en los empalmes longitudinales inferiores, disminuyendo la sección de resistente a tracción, subiendo el eje neutro de la viga. Es necesario reevaluar la ubicación de los empalmes longitudinales a tracción, los cuales fallaron en su mayoría concentrando los esfuerzos de los especímenes sobre una zona debilitada por las fallas.

### 4.3 DISEÑO PARA ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS BASE LAMINADO DE GUADUA.

El diseño de elementos constructivos base laminado de guadua se propone realizar por el método de esfuerzos admisibles adaptando el título G de la Norma Sismorresistente Colombiana referente al diseño de estructuras de madera.

Los esfuerzos admisibles utilizados en el diseño corresponden a los esfuerzos últimos de la caracterización del compuesto laminado afectados por unos factores de corrección por servicio y seguridad (F.S.), de reducción por tamaño (F.T.), de reducción por calidad (F.F), de duración de carga (F.D.C).

**4.3.1 Elementos Sometidos a Compresión.** Para los elementos a compresión el factor de corrección tentativo propuesto para el diseño es de 0.4<sup>18</sup> teniendo entonces que:

$$s_{c\text{adm}} = s_{c\text{ult}} * 0.4 \quad (12)$$

La carga admisible  $N_{\text{adm}}$  soportada por la columna se calcula con la ecuación 13

$$N_{\text{adm}} = s_{c\text{adm}} * A_N \quad (13)$$

Donde  $A_N$  es el área neta de la sección de la columna.

Se recomienda diseñar columnas cortas con relación  $l/d \leq 10$ <sup>19</sup>, donde  $l$  es la longitud de la columna y  $d$  el lado de la sección, ya que no se ha hecho un estudio de la esbeltez para las columnas de laminado de guadua.

---

<sup>18</sup> GABRIELE, José Y HERRERA, Hernán. O.p., Cit. pag. 19

<sup>19</sup> Norma Sismorresistente Colombiana. Título G.

**4.3.2. Elementos Sometidos a Flexión.** Para los elementos a flexión el factor de corrección tentativo propuesto para el diseño es de 0.313<sup>20</sup> teniendo entonces que:

$$s_{B adm} = s_{B ult} * 0.313 \quad (14)$$

El momento admisible  $M_{adm}$  resistida por la viga se calcula con la ecuación 15

$$M_{adm} \leq s_{B adm} * \frac{b * h^2}{6} \quad (15)$$

Donde b es la base de la viga y h la altura de la misma.

Para vigas cuya luz sea mayor de tres metros se debe diseñar la ubicación de los empalmes longitudinales en la zona de tracción con la metodología presentada en el Anexo G.

#### 4.4 ANÁLISIS DE COSTOS

Partiendo del análisis de la producción de laminado de guadua propuesto por Jörg Stamm<sup>21</sup> basado en precios de diciembre de 2001 para el eje cafetero colombiano, donde se tuvo en cuenta mano de obra, materia, prima, herramientas, maquinaria y utilidades, se hizo una proyección del precio a agosto de 2005 basándose en los Índices Totales de Costos de la Construcción de Vivienda (ICVV) suministrado por el Dane<sup>22</sup>. Se analizó el precio de metro lineal de una viga de laminado de guadua para una sección de 8cm x 11cm, estandarizada en el mercado local.

---

<sup>20</sup> GABRIELE, José Y HERRERA, Hernán. O.p., Cit. pag. 72

<sup>21</sup> STAMM, Jörg. Proyecto Latas y Laminados de Guadua, Informe Final; Proyecto U.T.P.-GTZ; Pereira, 2002.

<sup>22</sup> www.dane.gov.co

ICCV diciembre de 2001 = 118.65

ICCV agosto de 2005 = 152.38

Factor de Proyección = 1.28

Precio metro Lineal diciembre 2001= \$ 6746.67

Precio metro Lineal agosto 2005 = \$ 8635.73

Al precio obtenido se le agrega el costo del transporte desde el eje cafetero hasta Bucaramanga. Los precios por Tonelada/ Kilómetro para los diferentes tipos de camión para Junio del 2003<sup>23</sup> son proyectados a agosto de 2005 con el Índice de Precios al consumidor (IPC) suministrado por el DANE, suponiendo una distancia de recorrido de 800 Km, la densidad del laminado de 850 Kg/cm<sup>3</sup> propuesto por Jörg Stamm, se calcula el precio por metro lineal del flete (Ver tabla 19). Para el precio total de la viga en Bucaramanga se utiliza el costo del flete en el camión C2.

Tabla 19. Precio de Flete.

| Tipo Camión | Jun-03    | Ago-05                           |          |               |         |
|-------------|-----------|----------------------------------|----------|---------------|---------|
|             | \$ Ton/km | \$ Ton/km                        | \$ m3/km | \$ mL/km      | \$ mL   |
| C2          | 251,09    | 280,47                           | 238,40   | 2,10          | 1678,32 |
| C3          | 218,68    | 244,27                           | 207,63   | 1,83          | 1461,69 |
| CS          | 129,36    | 144,50                           | 122,82   | 1,08          | 864,66  |
| ICP = 1,117 |           | Den Lam = 850 Kg/cm <sup>3</sup> |          | Dist = 800 Km |         |

Precio metro Lineal Bucaramanga = 8635.73 + 1678.32

Precio metro Lineal Bucaramanga = \$ 10.314.05

Para el mercado local de maderas para la construcción se recopiló los siguientes precios por metro lineal para la sección estandarizada de 8cm \*11cm, consignados en la tabla 20.

<sup>23</sup> Tomado de: <http://www.mintransporte.gov.co>

Tabla 20. Precio de Vigas de Madera en el Mercado Local

| <b>Tipo Madera</b> | <b>Sección</b> | <b>Long (m)</b> | <b>\$/Viga</b> | <b>\$/ml de viga</b> |
|--------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------|
| Sapán              | 8cm x 11 cm    | 3               | 29000          | 9666,67              |
| Maquí              | 8cm x 11 cm    | 3               | 29000          | 9666,67              |

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

#### *COMPRESIÓN.*

El laminado ofrece mayor resistencia a la compresión cuando la carga es aplicada paralelamente a la dirección de la fibra. La compresión perpendicular tiene la menor resistencia y su deformación es alta, evidenciando que un elemento a base de laminado de guadua no puede ser diseñado para soportar cargas de compresión de forma directa en el sentido vertical. La compresión perpendicular por aplastamiento tiene una gran deformación y menor resistencia que la compresión paralela, sin embargo esta solicitud será común en los apoyos o cargas puntuales sobre las vigas, siendo importante su análisis en el diseño.

#### *TRACCIÓN*

Los esfuerzos resistentes a tracción para el compuesto laminado son mayores que los ofrecidos por las secciones de láminas con nudo, pero menores que los de secciones de lámina sin nudo. El elemento elaborado a base de laminado de guadua obligatoriamente tendrá nudos intermedios, ya que estos están presentes en la guadua cada 15-30 cm dependiendo de la parte del tallo y manejar secciones de laminados sin nudo implicaría mayor cantidad de empalmes, mayor costo y mayor número de líneas de debilidad.

#### *FLEXIÓN*

El laminado cuando es orientado verticalmente tiene mayor resistencia a la flexión y mayor modulo de elasticidad.

## DISEÑO DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO

Para el diseño del elemento constructivo se tendrá en cuenta los esfuerzos últimos obtenidos en la caracterización del compuesto laminado afectado por el factor de Seguridad y Servicio (F.S.), el Factor de Reducción por Calidad (F.C.), el Factor de reducción por Tamaño (F.T.) y el Factor de Duración de Carga (F.D.C.).

Los empalmes longitudinales a tracción en las vigas requieren un diseño especial, teniendo en cuenta su influencia en las líneas de fallas.

## *VIABILIDAD DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO.*

La comparación mecánica del laminado de guadua con otras especies de madera (Ver Sección 3.4), demuestra que el elemento propuesto en la presente investigación ofrece propiedades mecánicas competentes para el mercado de la construcción de madera.

Desde el punto de vista económico el laminado de guadua tiene un precio superior a las maderas utilizadas en el mercado sin embargo la sobrecosto no supera el 6%.(Ver Sección 4.3)

## **5.1 RECOMENDACIONES**

*RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS BASE LAMINADO DE GUADUA.*

- La materia prima para la elaboración de los elementos constructivos debe contar con los estándares de calidad apropiados para tal fin. Se aconseja que la guadua cumpla con los requisitos exigidos por la Norma Sismorresistente Colombiana en el capítulo de casas de Uno y Dos Pisos en bahareque encementado (E.7.4.1), de igual forma se recomienda no utilizar guadua con orificios abiertos para la inmunización.
- Se debe estandarizar secciones de los elementos viga y columna para poder tener producciones a en masa.
- Las uniones longitudinales deben hacerse lo mas resistentes posibles para la zona de tracción. Es aconsejable utilizar un empalme que involucre mayor área de contacto y resista esfuerzos combinados de tracción y cortantes. Uno de los empalmes más utilizados en la industria de los laminados de madera es el machihembrado (Ver Figura 1).
- Los empalmes longitudinales deben estar separados de un nivel a otro y en lo posible no ubicar uniones a la misma altura para los módulos de la zona de tracción, así se trate de niveles no consecutivos.
- La ubicación de los empalmes debe diseñarse para evitar la falla de éste antes que la guadua. En el anexo G se muestra un cálculo tipo para el diseño de la ubicación de los empalmes.

#### *RECOMENDACIONES GENERALES*

- Se recomienda hacer un estudio detallado de los diferentes tipos de solicitaciones para obtener parámetros de diseño, cuantificando los factores de corrección para obtener esfuerzos admisibles.

- Hacer un estudio de los empalmes longitudinales de diferentes tipos, caracterizando la resistencia que ofrece a la tracción cada uno de ellos. Se recomienda ensayar variaciones en la inclinación en los empalmes en bisel.
- Hacer un estudio de la influencia de los empalmes longitudinales en las columnas.
- Se recomienda realizar una investigación sobre el efecto de la esbeltez de las columnas en el diseño.
- Es recomendable para que la industria del laminado estructural se desarrolle en esta región crear una cultura del cultivo de la guadua.

## BIBLIOGRAFÍA

AIS. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. NSR-98. Normas Colombianas De Diseño Y Construcción Sismo Resistente. Tomo 4. Bogotá, 2002.

HIDALGO LÓPEZ, Oscar. Manual de construcción con bambú. CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

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

GABRIELE José Luis y HERRERA Hernán Darío. Parámetros de Diseño de Elementos de Guadua Cultivada en el Municipio de Aratoca, Santander. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga, 2004.

R. HOUWINK Wasse y G. Salomon, Enciclopedia de la Química Industrial Tomo 4, Adherencia y Adhesivos Vol. 2 , Ediciones Urmo; Holanda 1973

REY SOTO Álvaro, Laboratorio de Resistencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

STAMM Jörg, Proyecto Latas y Laminados de Guadua, Informe Final. Proyecto U.T.P.-GTZ. Pereira 2002

## ANEXO A. Máquinas de Laboratorio

MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA TREBEL. CAPACIDAD 40 TONELADAS.



MAQUINA PARA TRACCION INSTRON MODELO 1130 CAPACIDAD 1 TONELADA.



MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS PARA MADERAS MARACA AMSLER.  
CAPACIDAD 4 TONELADAS.



ANEXO B. Control de Variación de Humedad

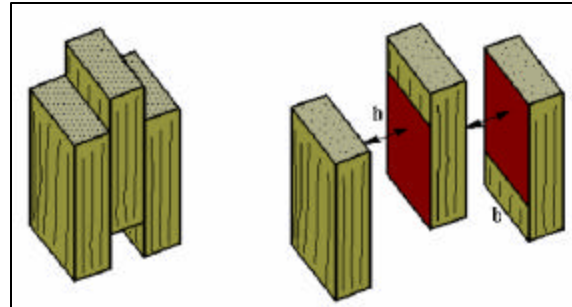
| Probeta CHN | L mm  | a mm | e mm | Vol (cm <sup>3</sup> ) | 13-Jun | 16-Jun | 20-Jun | 23-Jun | 27-Jun | 30-Jun | 05-Jul | 07-Jul | 12-Jun | 18-Jun | 16-Ago | w (gr.) SH |
|-------------|-------|------|------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 1           | 148.0 | 31.5 | 8.0  | 37.3                   | 24.52  | 24.46  | 24.46  | 24.57  | 24.5   | 24.57  | 24.26  | 24.34  | 24.52  | 24.53  | 24.34  | 21.65      |
| 2           | 149.0 | 31.5 | 7.5  | 35.2                   | 23.89  | 23.8   | 23.8   | 23.93  | 23.81  | 23.96  | 23.59  | 23.68  | 23.86  | 23.86  | 23.67  | 21.12      |
| 3           | 147.5 | 31.0 | 7.5  | 34.3                   | 32.14  | 32.08  | 32.08  | 32.2   | 32.1   | 32.2   | 31.85  | 31.95  | 32.14  | 32.15  | 31.95  | 28.39      |
| 4           | 148.0 | 31.5 | 8.0  | 37.3                   | 19.99  | 19.96  | 19.94  | 20.07  | 19.97  | 20.07  | 19.69  | 19.8   | 20.01  | 20.04  | 19.84  | 17.62      |
| 5           | 149.0 | 31.5 | 8.0  | 37.5                   | 27.55  | 27.5   | 27.51  | 27.64  | 27.54  | 27.66  | 27.28  | 27.38  | 27.58  | 27.56  | 27.41  | 24.23      |
| 6           | 148.0 | 31.5 | 7.5  | 35.0                   | 27.47  | 27.45  | 27.44  | 27.55  | 27.46  | 27.55  | 27.24  | 27.34  | 27.53  | 27.51  | 27.32  | 24.34      |
| 7           | 148.0 | 32.0 | 7.5  | 35.5                   | 30.79  | 30.75  | 30.76  | 30.9   | 30.82  | 30.91  | 30.53  | 30.63  | 30.86  | 30.85  | 30.65  | 27.51      |
| 8           | 148.0 | 33.0 | 7.5  | 36.6                   | 20.64  | 20.58  | 20.58  | 20.71  | 20.6   | 20.73  | 20.35  | 20.45  | 20.66  | 20.69  | 20.48  | 18.15      |
| 9           | 148.0 | 31.0 | 6.5  | 29.8                   | 16.99  | 16.95  | 16.94  | 17.05  | 16.97  | 17.07  | 16.75  | 16.82  | 17.00  | 17.00  | 16.83  | 14.94      |
| 10          | 149.0 | 32.5 | 7.5  | 36.3                   | 19.97  | 19.92  | 19.92  | 20.03  | 19.92  | 20.05  | 19.68  | 19.77  | 19.98  | 19.99  | 19.8   | 17.59      |
| 11          | 145.5 | 34.0 | 8.0  | 39.6                   | 23.57  | 23.5   | 23.51  | 23.63  | 23.51  | 23.65  | 23.31  | 23.42  | 23.58  | 23.58  | 23.41  | 20.72      |
| 12          | 149.0 | 31.5 | 7.5  | 35.2                   | 22.23  | 22.16  | 22.17  | 22.29  | 22.18  | 22.3   | 21.93  | 22.05  | 22.25  | 22.25  | 22.06  | 19.7       |
| 13          | 149.0 | 31.0 | 6.5  | 30.0                   | 17.19  | 17.13  | 17.14  | 17.25  | 17.14  | 17.24  | 16.91  | 17.01  | 17.21  | 17.2   | 17.03  | 15.07      |
| 14          | 149.0 | 31.5 | 8.0  | 37.5                   | 24.12  | 24.01  | 24.03  | 24.15  | 24.03  | 24.16  | 23.77  | 23.84  | 24.03  | 24.04  | 23.82  | 21.04      |
| TEMP. AMB.  |       |      |      |                        | 24°    | 22°    | 22°    | 21°    | 22°    | 21.5°  | 24°    | 21.5°  | 21°    | 21°    | 24°    |            |

| Probeta PCH | L mm  | a mm | e mm | Vol (cm <sup>3</sup> ) | 13-Jun | 16-Jun | 20-Jun | 23-Jun | 27-Jun | 30-Jun | 05-Jul | 07-Jul | 12-Jun | 18-Jun | 16-Ago | w (gr.) SH |
|-------------|-------|------|------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 1           | 147.5 | 33.0 | 7.0  | 34.07                  | 17.87  | 17.83  | 17.81  | 17.91  | 17.84  | 17.93  | 17.58  | 17.67  | 17.87  | 17.9   | 17.71  | 15.61      |
| 2           | 148.5 | 31.5 | 7.0  | 32.74                  | 22.79  | 22.7   | 22.72  | 22.83  | 22.74  | 22.82  | 22.51  | 22.58  | 22.76  | 22.77  | 22.59  | 20.29      |
| 3           | 147.5 | 31.5 | 8.0  | 37.17                  | 13.47  | 13.42  | 13.42  | 13.53  | 13.43  | 13.54  | 13.29  | 13.34  | 13.5   | 13.5   | 13.36  | 11.73      |
| 4           | 147.5 | 33.0 | 8.0  | 38.94                  | 22.01  | 21.95  | 21.97  | 22.08  | 21.97  | 22.09  | 21.75  | 21.82  | 22.03  | 22.02  | 21.84  | 19.38      |
| 5           | 149.0 | 30.0 | 8.0  | 35.76                  | 23.51  | 23.46  | 23.45  | 23.58  | 23.47  | 23.59  | 23.19  | 23.31  | 23.51  | 23.51  | 23.32  | 20.69      |
| 6           | 149.0 | 31.5 | 7.0  | 32.85                  | 16     | 15.95  | 15.95  | 16.05  | 15.97  | 16.08  | 15.78  | 15.86  | 16.03  | 16.02  | 15.88  | 14.01      |
| 7           | 147.0 | 31.5 | 7.5  | 34.73                  | 22.23  | 22.18  | 22.17  | 22.28  | 22.2   | 22.3   | 21.98  | 22.06  | 22.25  | 22.25  | 22.07  | 19.67      |
| 8           | 149.0 | 33.0 | 7.5  | 36.88                  | 19.64  | 19.58  | 19.59  | 19.71  | 19.63  | 19.72  | 19.38  | 19.46  | 19.65  | 19.65  | 19.48  | 17.36      |
| 9           | 148.0 | 31.0 | 7.0  | 32.12                  | 23.82  | 23.8   | 23.82  | 23.95  | 23.83  | 23.95  | 23.59  | 23.69  | 23.9   | 23.91  | 23.71  | 21.07      |
| 10          | 147.5 | 32.0 | 7.5  | 35.40                  | 17.37  | 17.32  | 17.33  | 17.43  | 17.3   | 17.42  | 17.07  | 17.16  | 17.35  | 17.37  | 17.19  | 15.18      |
| 11          | 149.0 | 32.5 | 7.5  | 36.32                  | 16.08  | 16.04  | 16.02  | 16.15  | 16.06  | 16.18  | 15.84  | 15.95  | 16.16  | 16.15  | 15.96  | 14.13      |
| 12          | 148.4 | 31.5 | 8.0  | 37.38                  | 28.32  | 28.28  | 28.28  | 28.39  | 28.32  | 28.4   | 28.06  | 28.15  | 28.35  | 28.36  | 28.18  | 25.04      |
| 13          | 147.0 | 33.0 | 7.0  | 33.96                  | 20.28  | 20.22  | 20.21  | 20.34  | 20.24  | 20.34  | 20.02  | 20.1   | 20.29  | 20.32  | 20.13  | 17.93      |
| 14          | 148.0 | 33.0 | 7.0  | 34.19                  | 18.53  | 18.48  | 18.49  | 18.58  | 18.5   | 18.62  | 18.26  | 18.36  | 18.56  | 18.56  | 18.4   | 16.23      |
| TEMP. AMB.  |       |      |      |                        | 24°    | 22°    | 22°    | 21°    | 22°    | 21.5°  | 24°    | 21.5°  | 21°    | 21°    | 24°    |            |

## ANEXO C. Geometría y dimensiones de las probetas de ensayos

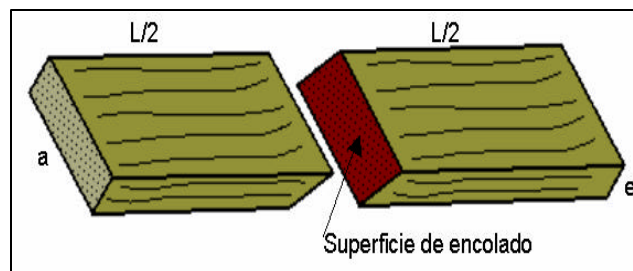
- Probeta de cortante para adhesivos, PVAC1, PVAC2, PCC.

| Probeta | h cm | b cm |
|---------|------|------|
| PVAC1 1 | 2.50 | 2.50 |
| PVAC1 2 | 2.65 | 2.60 |
| PVAC1 3 | 2.50 | 2.55 |
| PVAC1 4 | 2.50 | 2.50 |
| PVAC1 5 | 2.45 | 2.60 |
| PVAC2 1 | 2.50 | 2.55 |
| PVAC2 2 | 2.80 | 2.55 |
| PVAC2 3 | 2.60 | 2.60 |
| PVAC2 4 | 2.55 | 2.55 |
| PVAC2 5 | 2.55 | 2.60 |
| PCC 1   | 2.60 | 2.40 |
| PCC 2   | 2.20 | 2.40 |
| PCC 3   | 2.40 | 2.40 |
| PCC 4   | 2.70 | 2.40 |
| PCC 5   | 2.40 | 2.40 |



Las dimensiones  $b$  y  $h$  cubren el área de contacto entre las dos superficies de las láminas. Las dimensiones de cada lámina son 1"x0.4"x1.25"

- Probeta tipo para ensayo de tracción para adhesivos, PVA1, PVA2, PTC



Probetas PVA1

| Probeta | e cm | a cm |
|---------|------|------|
| PVA1 1  | 1.00 | 2.47 |
| PVA1 2  | 1.01 | 2.52 |
| PVA1 3  | 1.06 | 2.52 |
| PVA1 4  | 1.05 | 2.52 |
| PVA1 5  | 1.04 | 2.52 |
| PVA1 6  | 1.04 | 2.50 |
| PVA1 7  | 1.02 | 2.48 |
| PVA1 8  | 0.98 | 2.45 |
| PVA1 9  | 1.04 | 2.47 |
| PVA1 10 | 0.99 | 2.52 |

Probetas PVA1

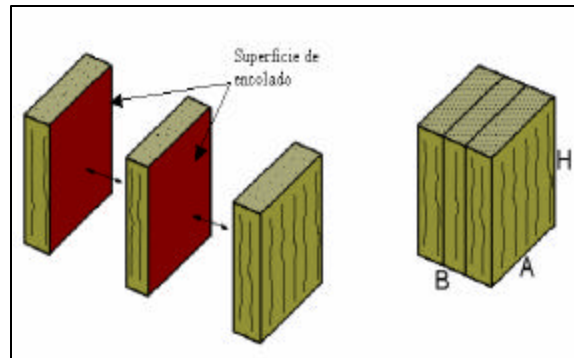
| Probeta | e cm | a cm |
|---------|------|------|
| PVA2 1  | 1.08 | 2.53 |
| PVA2 2  | 1.05 | 2.54 |
| PVA2 3  | 1.06 | 2.50 |
| PVA2 4  | 1.08 | 2.53 |
| PVA2 5  | 1.06 | 2.55 |
| PVA2 6  | 0.97 | 2.52 |
| PVA2 7  | 1.04 | 2.57 |
| PVA2 8  | 1.04 | 2.51 |
| PVA2 9  | 1.05 | 2.56 |

Probetas PCC

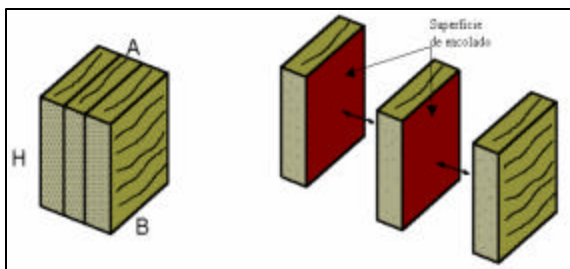
| Probeta | e cm | a cm |
|---------|------|------|
| PCC 1   | 1.07 | 2.50 |
| PCC 2   | 1.09 | 2.49 |
| PCC 3   | 1.08 | 2.53 |
| PCC 4   | 1.07 | 2.39 |
| PCC 5   | 1.02 | 2.50 |
| PCC 6   | 1.04 | 2.50 |
| PCC 7   | 1.03 | 2.53 |
| PCC 8   | 1.05 | 2.51 |
| PCC 9   | 1.08 | 2.51 |
| PCC 10  | 0.99 | 2.51 |

- Probeta de Compresión Paralela a la Fibra PCP

| PCP No | B cm | A cm | H cm |
|--------|------|------|------|
| 1      | 2.93 | 3.23 | 4.21 |
| 2      | 2.95 | 3.24 | 4.23 |
| 3      | 2.95 | 3.20 | 4.24 |
| 4      | 3.03 | 3.24 | 4.28 |
| 8      | 3.06 | 3.22 | 4.24 |
| 9      | 2.98 | 3.20 | 4.26 |
| 10     | 3.02 | 3.22 | 4.14 |
| 11     | 3.10 | 3.25 | 4.24 |



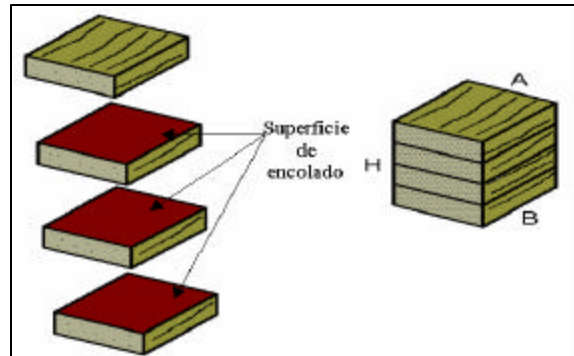
- Probeta de compresión perpendicular a la fibra PCPP



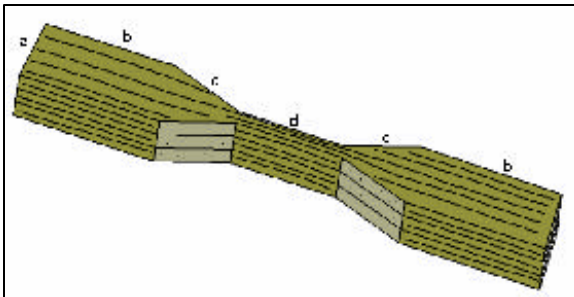
| PCPP No | B cm | A cm | H cm |
|---------|------|------|------|
| 1       | 3.05 | 3.21 | 4.21 |
| 2       | 2.95 | 3.17 | 4.21 |
| 3       | 2.97 | 3.23 | 4.21 |
| 4       | 3.03 | 3.28 | 4.22 |
| 5       | 2.90 | 3.21 | 4.25 |
| 7       | 2.98 | 3.20 | 4.23 |
| 9       | 2.93 | 3.18 | 4.25 |
| 12      | 3.00 | 3.19 | 4.25 |

- Probeta de compresión perpendicular a la fibra, aplastamiento PCPA

| PCPA No | B cm | A cm | H cm |
|---------|------|------|------|
| 1       | 3.20 | 3.24 | 3.95 |
| 2       | 3.17 | 3.26 | 4.03 |
| 3       | 3.15 | 3.18 | 3.99 |
| 4       | 3.17 | 3.04 | 3.95 |
| 5       | 3.00 | 3.08 | 3.92 |
| 7       | 3.17 | 3.20 | 3.91 |
| 8       | 3.15 | 3.14 | 3.91 |



- Probeta de tracción Paralela PTP



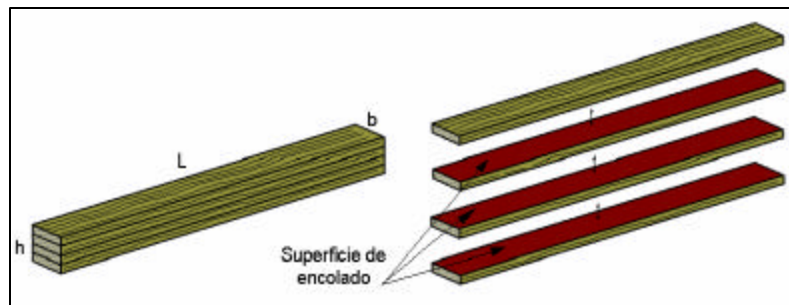
| PTP No | e cm | h cm |
|--------|------|------|
| 1      | 0.65 | 2.22 |
| 2      | 0.71 | 2.43 |
| 3      | 0.65 | 2.30 |
| 4      | 0.69 | 2.29 |
| 5      | 0.61 | 2.36 |
| 6      | 0.63 | 2.35 |

Las dimensiones siguientes fueron dadas teniendo en cuenta que se adaptaran fácilmente a la maquina universal de ensayos marca TREBEL.

$$a=3\text{cm} \quad d=6\text{cm} \quad c=4\text{cm} \quad b=8\text{cm}$$

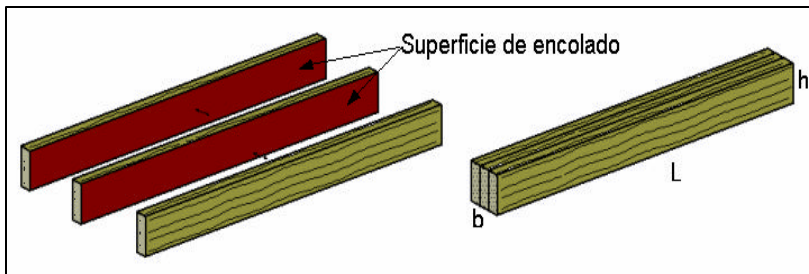
- Probeta tipo para ensayo de flexión horizontal PFH

| PFV No | b cm | h cm |
|--------|------|------|
| 1      | 2.31 | 3.1  |
| 2      | 2.36 | 3.0  |
| 3      | 2.37 | 3.1  |
| 4      | 2.41 | 3.1  |
| 5      | 2.36 | 3.1  |
| 6      | 2.39 | 3.1  |
| 9      | 2.37 | 3.0  |



La luz libre para todas las probetas luz=30cm L=35cm

- Probeta tipo para ensayo de flexión vertical PFV

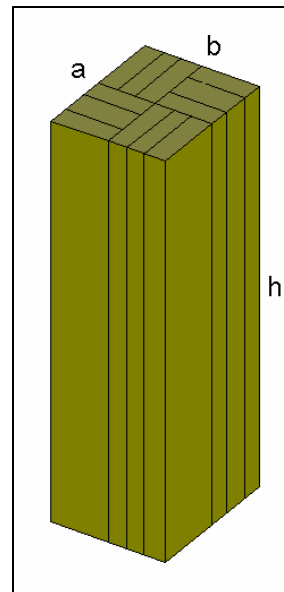


| PFH No | b cm | h cm |
|--------|------|------|
| 1      | 2.43 | 3.21 |
| 3      | 2.52 | 3.17 |
| 4      | 2.57 | 3.19 |
| 5      | 2.51 | 3.20 |
| 6      | 2.66 | 3.20 |
| 7      | 2.63 | 3.19 |
| 9      | 2.54 | 3.28 |
| 10     | 2.62 | 3.18 |

La luz libre para todas las probetas luz=30cm L=35cm

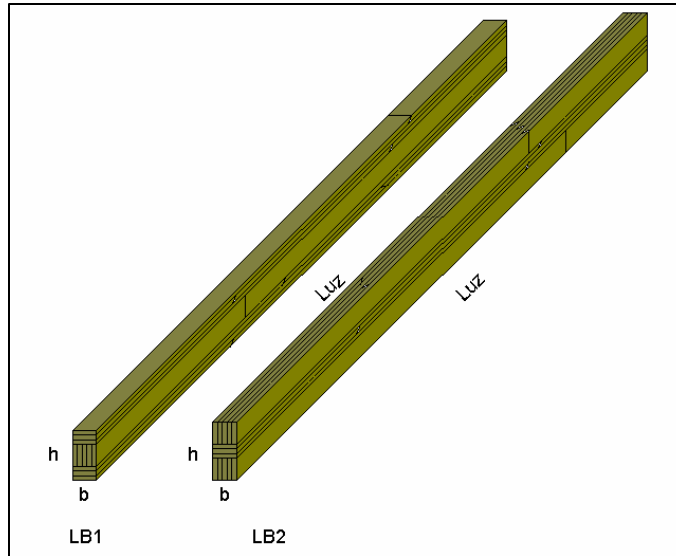
- Propuesta Elemento Columna

| COLUMNA | b cm | a cm | H cm |
|---------|------|------|------|
| 1       | 6,1  | 6,2  | 20,5 |
| 2       | 6,2  | 6,1  | 20,0 |
| 3       | 6,1  | 6,2  | 20,1 |
| 4       | 6    | 5,9  | 19,9 |
| 5       | 6,1  | 5,9  | 20,5 |



- Propuesta Elemento Viga

| CONFIGURACIÓN | VIGA | b cm | h cm |
|---------------|------|------|------|
| LB 1          | 1    | 3,5  | 7,9  |
|               | 2    | 3,5  | 7,9  |
| LB 2          | 3    | 3,5  | 8,4  |
|               | 4    | 3,5  | 8,4  |
| Luz (cm)      | 100  |      |      |



- Ubicación de Empalmes Longitudinales
- Viga 1

| VIGA 1   |       |                     |              |
|----------|-------|---------------------|--------------|
| Módulo   | Nivel | Distancia al centro |              |
|          |       | Lado Izquierdo      | Lado Derecho |
| Superior | 3     |                     | 18,3         |
|          | 2     | 17,3                |              |
|          | 1     |                     | 8,3          |
| Central  |       | 21,6 - 2,3 - 12,3   | 18           |
| Inferior | 3     | 6,7                 |              |
|          | 2     |                     | 16,7         |
|          | 1     | 18,3                |              |



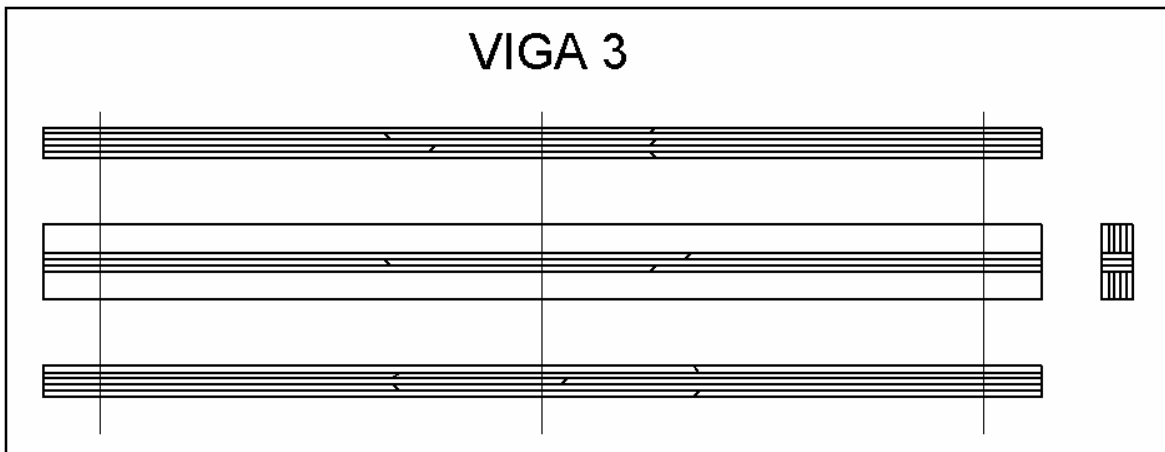
- Viga 2

| VIGA 2   |       |                     |              |
|----------|-------|---------------------|--------------|
| Módulo   | Nivel | Distancia al centro |              |
|          |       | Lado Izquierdo      | Lado Derecho |
| Superior | 3     | 7,8                 |              |
|          | 2     |                     | 16,8         |
|          | 1     | 17,2                |              |
| Central  |       | 15,8 - 2 - 10,8     | 19,3         |
| Inferior | 3     | 7,8                 |              |
|          | 2     |                     | 16,8         |
|          | 1     | 17,2                |              |



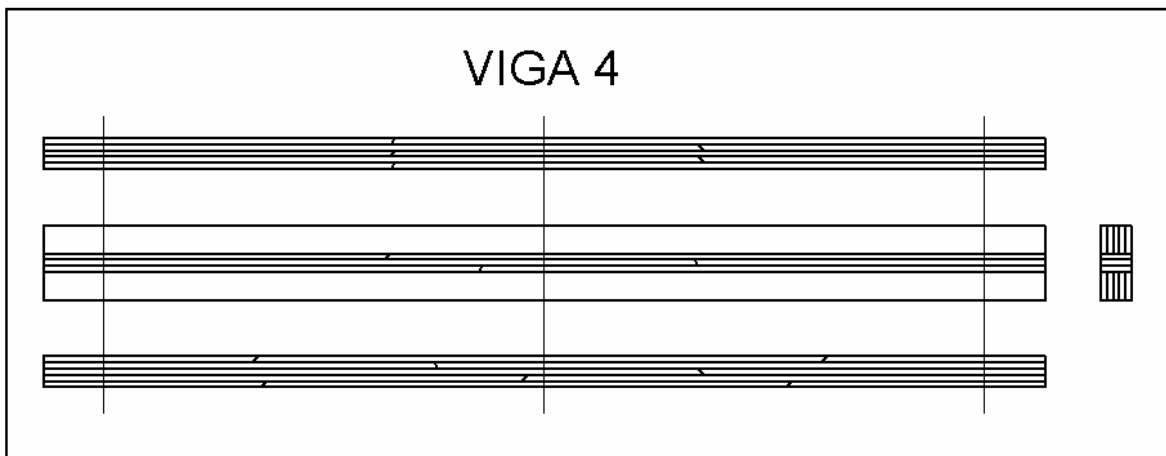
- Viga 3

| VIGA 3   |       |                     |              |
|----------|-------|---------------------|--------------|
| Módulo   | Nivel | Distancia al centro |              |
|          |       | Lado Izquierdo      | Lado Derecho |
| Superior |       | 17,8 - 12,8         | 12,3         |
| Central  | 3     |                     | 16,8         |
|          | 2     | 17,8                |              |
|          | 1     |                     | 12,8         |
| Inferior |       | 16,8                | 3 - 17,8     |



- Viga 4

| VIGA 4   |       |                        |                    |
|----------|-------|------------------------|--------------------|
| Módulo   | Nivel | Distancia al centro    |                    |
|          |       | Lado Izquierdo         | Lado Derecho       |
| Superior |       | 17,6                   | 18,1               |
| Central  | 3     | 18,1                   |                    |
|          | 2     |                        | 17,6               |
|          | 1     | 7,6                    |                    |
| Inferior |       | 32,4 - 12,6 - 2 - 32,1 | 32,1 - 18,1 - 28,1 |



## ANEXO D. Tablas de Resultados de ensayos

- Datos de Esfuerzo y Deformación en PCP.

| PCP 1 |         | PCP 2 |         | PCP 3 |         | PCP 4 |         | PCP 8 |         |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| s Mpa | ?       | s Mpa | ?       | s Mpa | ?       | s Mpa | ?       | s Mpa | ?       |
| 0     | 0       | 0     | 0       | 0     | 0       | 0     | 0       | 0     | 0       |
| 1.06  | 0,00000 | 1.05  | 0,00180 | 1.06  | 0,00300 | 1.02  | 0,00326 | 1.01  | 0       |
| 2.11  | 0,00151 | 2.09  | 0,00240 | 2.12  | 0,00389 | 2.04  | 0,00415 | 2.03  | 0,0008  |
| 3.17  | 0,00229 | 3.14  | 0,00300 | 3.18  | 0,00449 | 3.06  | 0,00564 | 3.04  | 0,0010  |
| 4.23  | 0,00308 | 4.18  | 0,00348 | 4.24  | 0,00509 | 4.07  | 0,00623 | 4.06  | 0,0015  |
| 5.28  | 0,00362 | 5.23  | 0,00360 | 5.30  | 0,00569 | 5.09  | 0,00682 | 5.07  | 0,00210 |
| 6.34  | 0,00422 | 6.28  | 0,00390 | 6.36  | 0,00629 | 6.11  | 0,00742 | 6.09  | 0,00240 |
| 7.40  | 0,00489 | 7.32  | 0,00390 | 7.42  | 0,00689 | 7.13  | 0,00801 | 7.10  | 0,00329 |
| 8.45  | 0,00549 | 8.37  | 0,00420 | 8.47  | 0,00725 | 8.15  | 0,00861 | 8.12  | 0,00431 |
| 9.51  | 0,00609 | 9.42  | 0,00450 | 9.53  | 0,00749 | 9.17  | 0,00890 | 9.13  | 0,00539 |
| 10.57 | 0,00694 | 10.46 | 0,00510 | 10.59 | 0,00791 | 10.19 | 0,00955 | 10.15 | 0,00599 |
| 11.62 | 0,00754 | 11.51 | 0,00510 | 11.65 | 0,00845 | 11.20 | 0,01009 | 11.16 | 0,00689 |
| 12.68 | 0,00814 | 12.55 | 0,00540 | 12.71 | 0,00899 | 12.22 | 0,01068 | 12.18 | 0,00779 |
| 13.74 | 0,00875 | 13.60 | 0,00600 | 13.77 | 0,00958 | 13.24 | 0,01128 | 13.19 | 0,00869 |
| 14.79 | 0,00935 | 14.65 | 0,00630 | 14.83 | 0,01000 | 14.26 | 0,01187 | 14.21 | 0,00929 |
| 15.85 | 0,01014 | 15.69 | 0,00661 | 15.89 | 0,01048 | 15.28 | 0,01246 | 15.22 | 0,01018 |
| 16.91 | 0,01086 | 16.74 | 0,00721 | 16.95 | 0,01084 | 16.30 | 0,01306 | 16.24 | 0,01078 |
| 17.96 | 0,01146 | 17.79 | 0,00751 | 18.01 | 0,01138 | 17.32 | 0,01365 | 17.25 | 0,01138 |
| 19.02 | 0,01207 | 18.83 | 0,00811 | 19.07 | 0,01168 | 18.34 | 0,01395 | 18.27 | 0,01198 |
| 20.08 | 0,01267 | 19.88 | 0,00841 | 20.13 | 0,01228 | 19.35 | 0,01454 | 19.28 | 0,01264 |
| 21.13 | 0,01327 | 20.92 | 0,00901 | 21.19 | 0,01258 | 20.37 | 0,01543 | 20.30 | 0,01330 |
| 22.19 | 0,01394 | 21.97 | 0,00961 | 22.25 | 0,01318 | 21.39 | 0,01602 | 21.31 | 0,01390 |
| 23.25 | 0,01478 | 23.02 | 0,01021 | 23.31 | 0,01324 | 22.41 | 0,01662 | 22.33 | 0,01468 |
| 24.30 | 0,01569 | 24.06 | 0,01081 | 24.36 | 0,01378 | 23.43 | 0,01691 | 23.34 | 0,01558 |
| 25.36 | 0,01659 | 25.11 | 0,01171 | 25.42 | 0,01384 | 24.45 | 0,01721 | 24.36 | 0,01617 |
| 26.42 | 0,01780 | 26.16 | 0,01231 | 26.48 | 0,01438 | 25.47 | 0,01780 | 25.37 | 0,01707 |
| 27.47 | 0,01900 | 27.20 | 0,01351 | 27.54 | 0,01444 | 26.48 | 0,01810 | 26.39 | 0,01803 |
| 28.53 | 0,02021 | 28.25 | 0,01441 | 28.60 | 0,01486 | 27.50 | 0,01869 | 27.40 | 0,01917 |
| 29.59 | 0,02142 | 29.29 | 0,01591 | 29.66 | 0,01504 | 28.52 | 0,01929 | 28.42 | 0,02067 |
| 30.64 | 0,02323 | 30.34 | 0,01741 | 30.72 | 0,01558 | 29.54 | 0,01988 | 29.43 | 0,02246 |
| 31.70 | 0,02534 | 31.39 | 0,01952 | 31.78 | 0,01617 | 30.56 | 0,02047 | 30.45 | 0,02456 |
| 32.76 | 0,02775 | 32.43 | 0,02222 | 32.84 | 0,01677 | 31.58 | 0,02166 | 31.46 | 0,02816 |
| 33.81 | 0,03017 | 33.48 | 0,02762 | 33.90 | 0,01737 | 32.60 | 0,02314 | 32.48 | 0,03295 |
| 34.87 | 0,03922 |       |         | 34.96 | 0,01803 | 33.61 | 0,02493 | 32.88 | 0,03954 |
| 34.98 | 0,04299 |       |         | 36.02 | 0,01917 | 34.63 | 0,03561 |       |         |
|       |         |       |         | 37.08 | 0,02097 |       |         |       |         |
|       |         |       |         | 38.14 | 0,02576 |       |         |       |         |

- Datos de Esfuerzo y Deformación Unitaria en PCP.

| PCP 9 |         |
|-------|---------|
| s Mpa | ?       |
| 0     | 0       |
| 1,05  | 0,00119 |
| 2,10  | 0,00179 |
| 3,15  | 0,00268 |
| 4,19  | 0,00298 |
| 5,24  | 0,00417 |
| 6,29  | 0,00477 |
| 7,34  | 0,00566 |
| 8,39  | 0,00626 |
| 9,44  | 0,00715 |
| 10,49 | 0,00775 |
| 11,54 | 0,00835 |
| 12,58 | 0,00894 |
| 13,63 | 0,00954 |
| 14,68 | 0,01043 |
| 15,73 | 0,01103 |
| 16,78 | 0,01163 |
| 17,83 | 0,01252 |
| 18,88 | 0,01312 |
| 19,92 | 0,01371 |
| 20,97 | 0,01431 |
| 22,02 | 0,01520 |
| 23,07 | 0,01610 |
| 24,12 | 0,01669 |
| 25,17 | 0,01729 |
| 30,41 | 0,01848 |
| 31,46 | 0,01908 |
| 32,51 | 0,01968 |
| 33,56 | 0,02146 |
| 35,65 | 0,02325 |
| 37,75 | 0,02564 |
| 38,91 | 0,03100 |

| PCP 10 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 0,51   | 0,00031 |
| 1,03   | 0,00184 |
| 1,54   | 0,00215 |
| 2,06   | 0,00245 |
| 2,57   | 0,00307 |
| 3,09   | 0,00368 |
| 3,60   | 0,00399 |
| 4,11   | 0,00460 |
| 4,63   | 0,00521 |
| 5,14   | 0,00552 |
| 5,66   | 0,00583 |
| 6,17   | 0,00614 |
| 6,68   | 0,00644 |
| 7,20   | 0,00675 |
| 7,71   | 0,00706 |
| 8,23   | 0,00736 |
| 8,74   | 0,00767 |
| 9,26   | 0,00798 |
| 9,77   | 0,00828 |
| 10,28  | 0,00859 |
| 10,80  | 0,00890 |
| 11,31  | 0,00920 |
| 11,83  | 0,00951 |
| 12,34  | 0,00982 |
| 12,85  | 0,00988 |
| 13,37  | 0,01043 |
| 13,88  | 0,01055 |
| 14,40  | 0,01098 |
| 14,91  | 0,01110 |
| 15,43  | 0,01135 |
| 15,94  | 0,01166 |
| 16,45  | 0,01215 |
| 16,97  | 0,01227 |
| 17,48  | 0,01258 |
| 18,00  | 0,01288 |
| 18,51  | 0,01319 |
| 19,02  | 0,01350 |

| PCP 10 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 19,54  | 0,01380 |
| 20,05  | 0,01405 |
| 20,57  | 0,01411 |
| 21,08  | 0,01423 |
| 21,60  | 0,01472 |
| 22,11  | 0,01472 |
| 22,62  | 0,01491 |
| 23,14  | 0,01528 |
| 23,65  | 0,01534 |
| 24,17  | 0,01564 |
| 24,68  | 0,01626 |
| 25,19  | 0,01657 |
| 25,71  | 0,01663 |
| 26,22  | 0,01706 |
| 26,74  | 0,01779 |
| 27,25  | 0,01779 |
| 27,77  | 0,01810 |
| 28,28  | 0,01841 |
| 28,79  | 0,01871 |
| 29,31  | 0,01933 |
| 29,82  | 0,02025 |
| 30,34  | 0,02037 |
| 30,85  | 0,02086 |
| 31,36  | 0,02147 |
| 31,88  | 0,02209 |
| 32,39  | 0,02270 |
| 32,91  | 0,02331 |
| 33,42  | 0,02485 |
| 33,94  | 0,02577 |
| 34,45  | 0,02761 |

| PCP 11 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 0,99   | 0       |
| 1,99   | 0,00180 |
| 2,98   | 0,00264 |
| 3,97   | 0,00306 |
| 4,96   | 0,00359 |
| 5,96   | 0,00389 |
| 6,95   | 0,00449 |
| 7,94   | 0,00509 |
| 8,93   | 0,00545 |
| 9,93   | 0,00599 |
| 10,92  | 0,00635 |
| 11,91  | 0,00683 |
| 12,90  | 0,00725 |
| 13,90  | 0,00779 |
| 14,89  | 0,00809 |
| 15,88  | 0,00875 |
| 16,87  | 0,00958 |
| 17,87  | 0,01018 |
| 18,86  | 0,01078 |
| 19,85  | 0,01198 |
| 20,84  | 0,01258 |
| 21,84  | 0,01324 |
| 22,83  | 0,01408 |
| 23,82  | 0,01504 |
| 24,81  | 0,01617 |
| 25,81  | 0,01737 |
| 26,80  | 0,01857 |
| 27,79  | 0,02007 |
| 28,78  | 0,02157 |
| 29,78  | 0,02456 |
| 30,77  | 0,02546 |
| 31,76  | 0,02756 |
| 32,75  | 0,02995 |
| 33,75  | 0,03235 |
| 34,74  | 0,03594 |
| 35,73  | 0,04193 |
| 35,93  | 0,04673 |

- Datos de Esfuerzo y Deformación Unitaria en PCPP.

| PCPP 1 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 3,57   | 0,00724 |
| 4,09   | 0,01508 |
| 4,60   | 0,03560 |
| 5,11   | 0,07300 |
| 5,62   | 0,10558 |
| 6,13   | 0,12730 |
| 6,64   | 0,15083 |
| 7,15   | 0,16591 |
| 7,66   | 0,17919 |
| 8,17   | 0,19186 |
| 8,68   | 0,20272 |
| 9,19   | 0,21358 |
| 9,70   | 0,22444 |
| 10,21  | 0,23288 |
| 10,72  | 0,24193 |
| 11,24  | 0,25159 |
| 11,75  | 0,26003 |
| 12,26  | 0,27029 |
| 12,77  | 0,28115 |
| 13,28  | 0,28960 |
| 13,48  | 0,29563 |

| PCPP 2 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 4,81   | 0,00030 |
| 5,35   | 0,00664 |
| 5,88   | 0,02655 |
| 6,42   | 0,05370 |
| 6,95   | 0,08024 |
| 7,49   | 0,10377 |
| 8,02   | 0,12248 |
| 8,55   | 0,13876 |
| 9,09   | 0,15324 |
| 9,62   | 0,16531 |
| 10,16  | 0,17617 |
| 10,69  | 0,18643 |
| 11,23  | 0,19668 |
| 11,76  | 0,20573 |
| 12,30  | 0,21418 |
| 12,83  | 0,22323 |
| 13,37  | 0,23349 |
| 13,90  | 0,24133 |
| 14,44  | 0,25762 |
| 14,97  | 0,26788 |
| 15,40  | 0,28960 |

| PCPP 3 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 4,69   | 0,00603 |
| 5,21   | 0,02293 |
| 5,73   | 0,07180 |
| 6,25   | 0,10498 |
| 6,78   | 0,13514 |
| 7,30   | 0,15686 |
| 7,82   | 0,17677 |
| 8,34   | 0,19427 |
| 8,86   | 0,20996 |
| 9,38   | 0,22675 |
| 9,90   | 0,29865 |

| PCPP 4 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 2,52   | 0,00542 |
| 3,02   | 0,00963 |
| 3,52   | 0,01715 |
| 4,02   | 0,04815 |
| 4,53   | 0,08186 |
| 5,03   | 0,12339 |
| 5,53   | 0,15047 |
| 6,04   | 0,17515 |
| 6,54   | 0,19501 |
| 7,04   | 0,21307 |
| 7,55   | 0,22691 |
| 8,05   | 0,23955 |
| 8,55   | 0,25159 |
| 9,06   | 0,26363 |
| 9,56   | 0,27567 |
| 10,06  | 0,28891 |
| 10,57  | 0,30998 |
| 11,07  | 0,33345 |

| PCPP 5 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 4,30   | 0,00421 |
| 4,83   | 0,00692 |
| 5,37   | 0,01144 |
| 5,91   | 0,02046 |
| 6,45   | 0,04334 |
| 6,98   | 0,07223 |
| 7,52   | 0,10834 |
| 8,06   | 0,14024 |
| 8,59   | 0,16673 |
| 9,13   | 0,18599 |
| 9,67   | 0,20525 |
| 10,21  | 0,21789 |
| 10,74  | 0,23474 |
| 11,28  | 0,24738 |
| 11,82  | 0,26062 |
| 12,35  | 0,27206 |
| 12,89  | 0,28470 |
| 13,43  | 0,29854 |
| 13,96  | 0,31600 |
| 14,50  | 0,32743 |
| 15,04  | 0,33646 |
| 15,58  | 0,35030 |
| 16,11  | 0,36896 |

| PCPP 9 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 4,83   | 0,00717 |
| 5,37   | 0,04423 |
| 5,90   | 0,08248 |
| 6,44   | 0,12192 |
| 6,98   | 0,15240 |
| 7,51   | 0,17810 |
| 8,05   | 0,19603 |
| 8,59   | 0,21157 |
| 9,12   | 0,22591 |
| 9,66   | 0,23786 |
| 10,20  | 0,26296 |
| 10,73  | 0,27372 |
| 11,27  | 0,28986 |
| 11,81  | 0,30779 |
| 12,34  | 0,33169 |
| 12,88  | 0,33946 |
| 13,42  | 0,35978 |
| 13,63  | 0,37293 |

| PCPP 7 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 4,83   | 0,00180 |
| 5,37   | 0,00961 |
| 5,91   | 0,01891 |
| 6,45   | 0,04924 |
| 6,98   | 0,09608 |
| 7,52   | 0,13931 |
| 8,06   | 0,17474 |
| 8,59   | 0,19756 |
| 9,13   | 0,21977 |
| 9,67   | 0,23899 |
| 10,21  | 0,26061 |
| 10,74  | 0,28222 |
| 11,06  | 0,30624 |

| PCPP 12 |         |
|---------|---------|
| s Mpa   | ?       |
| 0       | 0       |
| 4,18    | 0,00538 |
| 4,70    | 0,01853 |
| 5,22    | 0,05020 |
| 5,75    | 0,09204 |
| 6,27    | 0,12610 |
| 6,79    | 0,15061 |
| 7,31    | 0,17033 |
| 7,84    | 0,18527 |
| 8,36    | 0,20021 |
| 8,88    | 0,21276 |
| 9,40    | 0,23248 |
| 9,93    | 0,24982 |
| 10,45   | 0,25818 |
| 10,97   | 0,26595 |
| 11,49   | 0,27791 |
| 12,02   | 0,31675 |
| 12,54   | 0,33767 |

- Datos de Esfuerzo y Deformación Unitaria en PCPA

| PCPA 1 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 0,96   | 0       |
| 1,93   | 0,00579 |
| 2,41   | 0,01029 |
| 2,89   | 0,01672 |
| 3,38   | 0,02636 |
| 3,86   | 0,03987 |
| 4,34   | 0,05562 |
| 4,82   | 0,07138 |
| 5,30   | 0,08231 |
| 5,79   | 0,09324 |
| 6,27   | 0,10482 |
| 6,75   | 0,12025 |
| 7,23   | 0,13761 |
| 7,72   | 0,15562 |
| 8,20   | 0,17619 |
| 8,68   | 0,19677 |
| 9,16   | 0,21413 |
| 9,65   | 0,22956 |
| 10,61  | 0,26429 |
| 11,57  | 0,29451 |
| 12,54  | 0,32345 |
| 13,50  | 0,34660 |
| 14,47  | 0,36910 |
| 15,43  | 0,38968 |
| 16,40  | 0,40704 |
| 17,36  | 0,42698 |
| 18,33  | 0,44434 |
| 19,29  | 0,45398 |
| 20,25  | 0,45334 |
| 21,22  | 0,45334 |
| 22,18  | 0,45270 |
| 37,62  | 0,45338 |

| PCPA 2 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 0,97   | 0       |
| 1,94   | 0       |
| 2,42   | 0,00126 |
| 2,90   | 0,01513 |
| 3,39   | 0,03530 |
| 3,87   | 0,06681 |
| 4,35   | 0,09580 |
| 4,84   | 0,13488 |
| 5,32   | 0,16639 |
| 5,81   | 0,19286 |
| 6,29   | 0,21870 |
| 7,26   | 0,26345 |
| 7,74   | 0,28236 |
| 8,23   | 0,29938 |
| 8,71   | 0,31388 |
| 9,19   | 0,32648 |
| 9,68   | 0,33909 |
| 10,64  | 0,36430 |
| 11,61  | 0,38447 |
| 12,58  | 0,40211 |
| 13,55  | 0,41787 |
| 14,51  | 0,42606 |
| 17,42  | 0,42796 |
| 18,39  | 0,42922 |
| 19,35  | 0,43048 |
| 20,32  | 0,43111 |
| 21,29  | 0,43111 |
| 22,26  | 0,43142 |
| 23,22  | 0,43174 |
| 24,19  | 0,43237 |
| 25,16  | 0,43268 |
| 26,13  | 0,43300 |
| 27,09  | 0,43394 |
| 28,06  | 0,43363 |
| 29,03  | 0,43363 |
| 30,00  | 0,43363 |
| 30,97  | 0,43363 |
| 31,93  | 0,43394 |
| 32,90  | 0,43394 |
| 33,87  | 0,43394 |
| 34,84  | 0,43426 |
| 35,80  | 0,43426 |
| 36,77  | 0,43426 |

| PCPA 3 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 1,00   | 0       |
| 2,00   | 0       |
| 2,50   | 0,01146 |
| 2,99   | 0,02419 |
| 3,49   | 0,04138 |
| 3,99   | 0,06684 |
| 4,49   | 0,09231 |
| 4,99   | 0,12095 |
| 5,49   | 0,14960 |
| 5,99   | 0,17761 |
| 6,99   | 0,22790 |
| 7,49   | 0,25145 |
| 7,99   | 0,27373 |
| 8,49   | 0,29156 |
| 8,98   | 0,30875 |
| 9,48   | 0,32466 |
| 9,98   | 0,34249 |
| 10,98  | 0,36795 |
| 11,98  | 0,39150 |
| 12,98  | 0,41124 |
| 13,98  | 0,42652 |
| 14,97  | 0,44052 |
| 15,97  | 0,43861 |
| 16,97  | 0,43734 |
| 17,97  | 0,43670 |
| 18,97  | 0,43607 |
| 19,97  | 0,43479 |
| 20,96  | 0,43479 |
| 21,96  | 0,43479 |
| 22,96  | 0,43479 |
| 23,96  | 0,43479 |

| PCPA 4 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 1,04   | 0       |
| 2,08   | 0       |
| 2,59   | 0       |
| 3,11   | 0,00064 |
| 3,63   | 0,01415 |
| 4,15   | 0,02701 |
| 4,67   | 0,04115 |
| 5,19   | 0,06109 |
| 5,71   | 0,08617 |
| 6,23   | 0,10417 |
| 6,74   | 0,11284 |
| 7,26   | 0,14083 |
| 7,78   | 0,15690 |
| 8,30   | 0,17298 |
| 8,82   | 0,18970 |
| 9,34   | 0,20642 |
| 9,86   | 0,22635 |
| 10,38  | 0,23985 |
| 11,41  | 0,27201 |
| 12,45  | 0,30094 |
| 13,49  | 0,32602 |
| 14,53  | 0,34853 |
| 15,57  | 0,36846 |
| 16,60  | 0,38711 |
| 17,64  | 0,40383 |
| 18,68  | 0,41797 |
| 19,72  | 0,42569 |
| 20,75  | 0,42505 |
| 21,79  | 0,42569 |
| 22,83  | 0,42633 |
| 23,87  | 0,42762 |
| 24,90  | 0,42955 |
| 25,94  | 0,43019 |
| 26,98  | 0,43148 |
| 28,02  | 0,43212 |
| 29,06  | 0,43276 |
| 30,09  | 0,43341 |
| 31,13  | 0,43373 |
| 32,17  | 0,43405 |
| 33,21  | 0,43469 |
| 34,24  | 0,43502 |
| 35,28  | 0,43534 |
| 36,32  | 0,43566 |
| 37,36  | 0,43566 |
| 38,39  | 0,43566 |
| 39,43  | 0,43566 |

- Datos de Esfuerzo y Deformación Unitaria en PCPA.

| PCPA 5 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 1,08   | 0       |
| 2,16   | 0       |
| 2,71   | 0       |
| 3,25   | 0,00130 |
| 3,79   | 0,01944 |
| 4,33   | 0,03369 |
| 4,87   | 0,05119 |
| 5,41   | 0,07387 |
| 5,95   | 0,09395 |
| 6,49   | 0,11404 |
| 7,03   | 0,13218 |
| 7,58   | 0,15097 |
| 8,12   | 0,17689 |
| 8,66   | 0,20087 |
| 9,20   | 0,22679 |
| 9,74   | 0,24687 |
| 10,28  | 0,26502 |
| 10,82  | 0,27992 |
| 11,90  | 0,30778 |
| 12,99  | 0,32916 |
| 14,07  | 0,34601 |
| 15,15  | 0,36221 |
| 16,23  | 0,37841 |
| 17,32  | 0,38942 |
| 18,40  | 0,40173 |
| 19,48  | 0,41145 |
| 20,56  | 0,41664 |
| 21,65  | 0,41923 |
| 22,73  | 0,42053 |
| 23,81  | 0,42377 |
| 24,89  | 0,42441 |
| 25,97  | 0,42636 |
| 27,06  | 0,42701 |
| 28,14  | 0,42765 |
| 29,22  | 0,42830 |
| 30,30  | 0,42863 |
| 31,39  | 0,42895 |
| 32,47  | 0,40303 |
| 33,55  | 0,40303 |
| 34,63  | 0,40335 |
| 35,71  | 0,40335 |
| 36,80  | 0,42960 |
| 37,88  | 0,42960 |
| 38,96  | 0,42960 |
| 40,04  | 0,41016 |
| 41,13  | 0,41016 |

| PCPA 7 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 0,99   | 0       |
| 1,97   | 0       |
| 2,46   | 0,01364 |
| 2,96   | 0,02728 |
| 3,45   | 0,04937 |
| 3,94   | 0,08185 |
| 4,44   | 0,11498 |
| 4,93   | 0,14941 |
| 5,42   | 0,17929 |
| 5,91   | 0,20268 |
| 6,41   | 0,22542 |
| 6,90   | 0,24750 |
| 7,39   | 0,26374 |
| 7,89   | 0,28518 |
| 8,38   | 0,30272 |
| 8,87   | 0,31831 |
| 9,37   | 0,33390 |
| 9,86   | 0,34754 |
| 10,84  | 0,37483 |
| 11,83  | 0,39627 |
| 12,82  | 0,41705 |
| 13,80  | 0,43394 |
| 14,79  | 0,43329 |
| 15,77  | 0,43264 |
| 16,76  | 0,43135 |
| 17,74  | 0,43005 |
| 18,73  | 0,42810 |
| 19,72  | 0,42745 |
| 20,70  | 0,42680 |
| 21,69  | 0,42680 |
| 22,67  | 0,42680 |
| 23,66  | 0,42615 |
| 24,65  | 0,42550 |
| 25,63  | 0,42485 |
| 26,62  | 0,42485 |
| 27,60  | 0,42420 |
| 28,59  | 0,42420 |
| 29,57  | 0,42420 |
| 30,56  | 0,42355 |
| 31,55  | 0,42355 |
| 32,53  | 0,42290 |
| 33,52  | 0,42290 |
| 34,50  | 0,42290 |
| 35,49  | 0,42225 |
| 36,47  | 0,42225 |
| 37,46  | 0,42160 |

| PCPA 8 |         |
|--------|---------|
| s Mpa  | ?       |
| 0      | 0       |
| 1,01   | 0       |
| 2,02   | 0,00065 |
| 2,53   | 0,00585 |
| 3,03   | 0,01104 |
| 3,54   | 0,01689 |
| 4,04   | 0,02534 |
| 4,55   | 0,03833 |
| 5,06   | 0,06171 |
| 5,56   | 0,08575 |
| 6,07   | 0,11173 |
| 6,57   | 0,13772 |
| 7,08   | 0,16046 |
| 7,58   | 0,18254 |
| 8,09   | 0,20398 |
| 8,59   | 0,22282 |
| 9,10   | 0,24101 |
| 9,60   | 0,25985 |
| 10,11  | 0,27479 |
| 11,12  | 0,30532 |
| 12,13  | 0,33260 |
| 13,14  | 0,35079 |
| 14,15  | 0,36963 |
| 15,17  | 0,38652 |
| 16,18  | 0,39951 |
| 17,19  | 0,41381 |
| 18,20  | 0,41965 |
| 19,21  | 0,41965 |
| 20,22  | 0,42095 |
| 21,23  | 0,42355 |
| 22,24  | 0,42680 |
| 23,25  | 0,43070 |
| 24,26  | 0,43264 |
| 25,28  | 0,43459 |
| 26,29  | 0,43654 |
| 27,30  | 0,43914 |
| 28,31  | 0,44044 |
| 29,32  | 0,44174 |
| 30,33  | 0,44434 |
| 31,34  | 0,44629 |
| 32,35  | 0,44759 |
| 33,36  | 0,44824 |

- Datos de Carga y Deflexión en PFV

| Probeta 1 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,05   |
| 1,5       | 0,09   |
| 2         | 0,52   |
| 2,2       | 0,9652 |
| 2,4       | 1,2954 |
| 2,6       | 1,6256 |
| 2,8       | 1,9812 |
| 3         | 2,3876 |
| 3,2       | 2,8194 |
| 3,4       | 3,4544 |
| 3,6       | 4,0132 |
| 3,8       | 4,9022 |
| 4         | 5,715  |
| 4,2       | 7,2136 |
| 4,4       | 9,906  |
| 4,6       | 14,224 |
| 4,65      | 18,796 |

| Probeta 2 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,9652 |
| 1,5       | 1,7272 |
| 2         | 2,4892 |
| 2,2       | 2,9972 |
| 2,4       | 3,4036 |
| 2,6       | 3,7592 |
| 2,8       | 4,4196 |
| 3         | 5,1054 |
| 3,2       | 5,8166 |
| 3,4       | 6,7056 |
| 3,6       | 7,5184 |
| 3,8       | 8,763  |
| 4         | 11,049 |
| 4,2       | 14,351 |
| 4,4       | 19,939 |
| 4,5       | 21,59  |

| Probeta 3 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,086  |
| 1,5       | 0,223  |
| 2         | 0,725  |
| 2,2       | 0,985  |
| 2,4       | 1,1684 |
| 2,6       | 1,5748 |
| 2,8       | 1,8796 |
| 3         | 2,2098 |
| 3,2       | 2,6416 |
| 3,4       | 3,0734 |
| 3,6       | 3,6322 |
| 3,8       | 4,2672 |
| 4         | 5,0038 |
| 4,2       | 6,096  |
| 4,3       | 10,668 |

| Probeta 4 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,12   |
| 1,5       | 0,5588 |
| 2         | 0,9652 |
| 2,22      | 1,1176 |
| 2,4       | 1,3716 |
| 2,6       | 1,6256 |
| 2,8       | 1,9812 |
| 3         | 2,286  |
| 3,2       | 2,7178 |
| 3,4       | 3,1496 |
| 3,6       | 3,6322 |
| 3,8       | 4,191  |
| 4         | 4,826  |
| 4,2       | 5,5372 |
| 4,4       | 6,477  |
| 4,6       | 7,9756 |
| 4,75      | 9,398  |

| Probeta 5 |       |
|-----------|-------|
| P KN      | ? mm  |
| 0         | 0     |
| 1         | 0,08  |
| 1,5       | 0,50  |
| 2         | 1,00  |
| 2,2       | 1,27  |
| 2,4       | 1,63  |
| 2,6       | 2,13  |
| 2,8       | 2,57  |
| 3         | 3,15  |
| 3,2       | 3,76  |
| 3,4       | 4,27  |
| 3,6       | 5,33  |
| 3,8       | 6,65  |
| 4         | 8,94  |
| 4,2       | 11,18 |

| Probeta 6 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,0125 |
| 1,5       | 0,098  |
| 2         | 0,42   |
| 2,2       | 0,83   |
| 2,4       | 1,0414 |
| 2,6       | 1,3462 |
| 2,8       | 1,7018 |
| 3         | 2,0574 |
| 3,2       | 2,4384 |
| 3,4       | 2,8956 |
| 3,6       | 3,5052 |
| 3,8       | 4,1148 |
| 4         | 4,8514 |
| 4,2       | 5,8166 |
| 4,4       | 7,112  |
| 4,6       | 8,4836 |
| 4,7       | 9,906  |

| Probeta 9 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ? mm   |
| 0         | 0      |
| 1         | 0,336  |
| 1,5       | 0,756  |
| 2         | 1,016  |
| 2,2       | 1,3208 |
| 2,4       | 1,7018 |
| 2,6       | 2,032  |
| 2,8       | 2,4384 |
| 3         | 2,794  |
| 3,2       | 3,3528 |
| 3,4       | 3,9116 |
| 3,6       | 4,7244 |
| 3,8       | 5,5626 |
| 4         | 6,8072 |
| 4,2       | 8,1026 |
| 4,4       | 11,608 |
| 4,6       | 15,494 |
| 4,75      | 20,32  |

- Datos de Carga y Deflexión en PFH

| Probeta 1 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ?mm    |
| 0         | 0      |
| 0,5       | 0,0508 |
| 1         | 0,9398 |
| 1,5       | 1,8796 |
| 2         | 2,9718 |
| 2,2       | 3,556  |
| 2,4       | 4,191  |
| 2,6       | 4,826  |
| 2,8       | 5,334  |
| 3         | 5,9436 |
| 3,6       | 8,382  |
| 3,8       | 10,414 |
| 4,2       | 12,04  |

| Probeta 3 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ?mm    |
| 0         | 0      |
| 0,5       | 0,09   |
| 1         | 0,1524 |
| 1,5       | 1,2954 |
| 2         | 2,2352 |
| 2,2       | 2,667  |
| 2,4       | 3,1496 |
| 2,6       | 3,7084 |
| 2,8       | 4,3688 |
| 3         | 5,0292 |
| 3,2       | 5,8928 |
| 3,4       | 7,0866 |
| 3,6       | 8,382  |
| 3,8       | 9,398  |
| 3,95      | 11,786 |

| Probeta No 4 |        |
|--------------|--------|
| P KN         | ?mm    |
| 0            | 0      |
| 0,5          | 0,0978 |
| 1            | 0,76   |
| 1,5          | 1,143  |
| 2            | 2,0066 |
| 2,2          | 2,3876 |
| 2,4          | 2,8194 |
| 2,6          | 3,302  |
| 2,8          | 3,9624 |
| 3            | 4,3815 |
| 3,2          | 4,8514 |
| 3,4          | 5,5118 |
| 3,6          | 6,1214 |
| 3,8          | 6,858  |
| 4            | 7,7978 |

| Probeta No 5 |        |
|--------------|--------|
| P KN         | ?mm    |
| 0            | 0      |
| 0,5          | 0,078  |
| 1            | 0,235  |
| 1,5          | 0,508  |
| 2            | 1,397  |
| 2,2          | 1,8034 |
| 2,4          | 2,2352 |
| 2,6          | 2,794  |
| 2,8          | 3,3782 |
| 3            | 4,064  |
| 3,2          | 4,8514 |
| 3,4          | 5,588  |
| 3,6          | 6,35   |
| 3,8          | 7,2136 |
| 4            | 8,0264 |
| 4,2          | 9,0932 |
| 4,4          | 10,922 |

| Probeta No 9 |        |
|--------------|--------|
| P KN         | ?mm    |
| 0            | 0      |
| 0,5          | 0,1143 |
| 1            | 0,508  |
| 1,5          | 0,9906 |
| 2            | 1,524  |
| 2,2          | 1,8034 |
| 2,4          | 2,0828 |
| 2,6          | 2,40   |
| 2,8          | 2,8194 |
| 3            | 3,048  |
| 3,2          | 3,7846 |
| 3,4          | 4,2672 |
| 3,6          | 4,8768 |
| 3,8          | 5,5372 |
| 4            | 6,3246 |
| 4,2          | 7,1374 |
| 4,4          | 8,128  |
| 4,6          | 9,3472 |
| 4,8          | 11,481 |
| 5            | 15,697 |
| 5,1          | 20,879 |

| Probeta 7 |        |
|-----------|--------|
| P KN      | ?mm    |
| 0         | 0      |
| 0,5       | 0      |
| 1         | 0,0508 |
| 1,5       | 0,9398 |
| 2         | 1,5748 |
| 2,2       | 1,8034 |
| 2,4       | 2,1844 |
| 2,6       | 2,54   |
| 2,8       | 2,8448 |
| 3         | 3,175  |
| 3,2       | 3,556  |
| 3,4       | 3,9624 |
| 3,6       | 4,4196 |
| 3,8       | 5,1562 |
| 4         | 6,1976 |
| 4,2       | 7,112  |
| 4,4       | 8,3058 |
| 4,8       | 10,668 |
| 5         | 11,532 |
| 5,1       | 14,478 |

| Probeta No 10 |        |
|---------------|--------|
| P KN          | ?mm    |
| 0             | 0      |
| 0,5           | 0,213  |
| 1             | 0,635  |
| 1,5           | 1,27   |
| 2             | 2,032  |
| 2,2           | 2,54   |
| 2,4           | 2,921  |
| 2,6           | 3,4036 |
| 2,8           | 3,937  |
| 3             | 4,572  |
| 3,2           | 5,1562 |
| 3,4           | 5,842  |
| 3,6           | 6,35   |
| 3,8           | 6,858  |
| 4             | 7,493  |
| 4,2           | 8,001  |
| 4,4           | 8,636  |
| 4,6           | 9,271  |
| 4,8           | 10,135 |

| Probeta No 6 |        |
|--------------|--------|
| P KN         | ?mm    |
| 0            | 0      |
| 0,5          | 0      |
| 1            | 0,1016 |
| 1,5          | 1,143  |
| 2            | 2,3622 |
| 2,2          | 2,9972 |
| 2,4          | 3,7592 |
| 2,6          | 4,4704 |
| 2,8          | 5,4356 |
| 3            | 6,604  |
| 3,2          | 7,747  |
| 3,4          | 9,4488 |
| 3,6          | 10,465 |
| 3,8          | 12,497 |
| 4            | 14,91  |
| 4,2          | 20,32  |
| 4,3          | 25,908 |

## ANEXO E. Esfuerzos y Deformaciones en Propuesta de Elementos.

- Tablas de Esfuerzo y Deformación para las Columnas

| COLUMNA 1 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 0         | 0      |
| 1,32      | 0,0011 |
| 2,64      | 0,0020 |
| 3,97      | 0,0025 |
| 5,29      | 0,0030 |
| 6,61      | 0,0034 |
| 7,93      | 0,0037 |
| 9,25      | 0,0040 |
| 10,58     | 0,0043 |
| 11,90     | 0,0046 |
| 13,22     | 0,0049 |
| 14,54     | 0,0052 |
| 15,86     | 0,0055 |
| 17,19     | 0,0059 |
| 18,51     | 0,0061 |
| 19,83     | 0,0064 |
| 21,15     | 0,0068 |
| 22,47     | 0,0071 |
| 23,80     | 0,0074 |
| 25,12     | 0,0078 |
| 26,44     | 0,0083 |
| 27,76     | 0,0089 |
| 29,09     | 0,0095 |
| 30,41     | 0,0104 |
| 31,73     | 0,0115 |
| 33,05     | 0,0138 |
| 32,39     | 0,0190 |
| 31,73     | 0,0228 |
| 30,41     | 0,0248 |
| 29,09     | 0,0263 |
| 27,76     | 0,0284 |
| 25,12     | 0,0321 |
| 21,15     | 0,0347 |
| 20,76     | 0,0401 |
| 20,84     | 0,0441 |
| 20,89     | 0,0491 |
| 20,62     | 0,0528 |
| 20,10     | 0,0575 |
| 19,83     | 0,0621 |
| 19,30     | 0,0672 |
| 18,51     | 0,0747 |
| 17,85     | 0,0799 |
| 17,19     | 0,0855 |

| COLUMNA 2 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 0         | 0      |
| 1,32      | 0,0009 |
| 2,64      | 0,0016 |
| 3,97      | 0,0022 |
| 5,29      | 0,0027 |
| 6,61      | 0,0032 |
| 7,93      | 0,0037 |
| 9,25      | 0,0041 |
| 10,58     | 0,0044 |
| 11,90     | 0,0048 |
| 13,22     | 0,0051 |
| 14,54     | 0,0055 |
| 15,86     | 0,0057 |
| 17,19     | 0,0060 |
| 18,51     | 0,0063 |
| 19,83     | 0,0066 |
| 21,15     | 0,0069 |
| 22,47     | 0,0072 |
| 23,80     | 0,0075 |
| 25,12     | 0,0078 |
| 26,44     | 0,0081 |
| 27,76     | 0,0085 |
| 29,09     | 0,0088 |
| 30,41     | 0,0085 |
| 31,73     | 0,0098 |
| 33,05     | 0,0106 |
| 34,37     | 0,0116 |
| 35,03     | 0,0123 |
| 35,70     | 0,0131 |
| 36,36     | 0,0148 |
| 34,37     | 0,0169 |
| 33,05     | 0,0199 |
| 31,73     | 0,0218 |
| 30,41     | 0,0237 |
| 27,76     | 0,0248 |
| 23,80     | 0,0257 |
| 21,15     | 0,0263 |
| 18,51     | 0,0260 |
| 15,86     | 0,0257 |
| 14,54     | 0,0263 |
| 13,22     | 0,0244 |
| 11,90     | 0,0241 |
| 11,24     | 0,0237 |

| COLUMNA 2 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 10,58     | 0,0236 |
| 11,24     | 0,0236 |
| 11,90     | 0,0237 |
| 12,56     | 0,0237 |
| 13,22     | 0,0239 |
| 14,54     | 0,0241 |
| 15,86     | 0,0243 |
| 17,19     | 0,0245 |
| 18,51     | 0,0248 |
| 19,83     | 0,0250 |
| 21,15     | 0,0253 |
| 22,47     | 0,0255 |
| 23,80     | 0,0260 |
| 24,85     | 0,0270 |
| 24,99     | 0,0277 |
| 24,59     | 0,0288 |
| 24,85     | 0,0323 |
| 24,59     | 0,0345 |
| 24,33     | 0,0367 |
| 23,93     | 0,0419 |
| 24,19     | 0,0497 |
| 25,12     | 0,0565 |
| 23,80     | 0,0660 |

| COLUMNA 4 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 0         | 0      |
| 1,41      | 0,0002 |
| 2,82      | 0,0008 |
| 4,24      | 0,0012 |
| 5,65      | 0,0016 |
| 7,06      | 0,0019 |
| 8,47      | 0,0022 |
| 9,89      | 0,0026 |
| 11,30     | 0,0029 |
| 12,71     | 0,0032 |
| 14,12     | 0,0034 |
| 15,54     | 0,0037 |
| 16,95     | 0,0040 |
| 18,36     | 0,0043 |
| 19,77     | 0,0046 |
| 21,19     | 0,0049 |
| 22,60     | 0,0052 |
| 24,01     | 0,0055 |
| 25,42     | 0,0058 |
| 26,84     | 0,0061 |
| 28,25     | 0,0065 |
| 29,66     | 0,0070 |
| 31,07     | 0,0073 |
| 32,49     | 0,0077 |
| 33,90     | 0,0081 |
| 35,31     | 0,0086 |
| 36,72     | 0,0093 |
| 38,14     | 0,0101 |
| 38,98     | 0,0110 |
| 39,27     | 0,0115 |
| 39,55     | 0,0131 |
| 39,83     | 0,0138 |
| 39,55     | 0,0147 |
| 38,70     | 0,0165 |
| 38,14     | 0,0170 |
| 36,72     | 0,0195 |
| 35,31     | 0,0221 |
| 34,18     | 0,0260 |
| 34,60     | 0,0292 |
| 34,18     | 0,0323 |
| 34,04     | 0,0345 |
| 34,18     | 0,0370 |
| 34,46     | 0,0440 |
| 34,75     | 0,0486 |
| 34,89     | 0,0563 |
| 34,46     | 0,0615 |
| 33,90     | 0,0645 |
| 32,49     | 0,0679 |
| 31,07     | 0,0716 |
| 28,25     | 0,0747 |
| 25,42     | 0,0813 |
| 22,60     | 0,0887 |

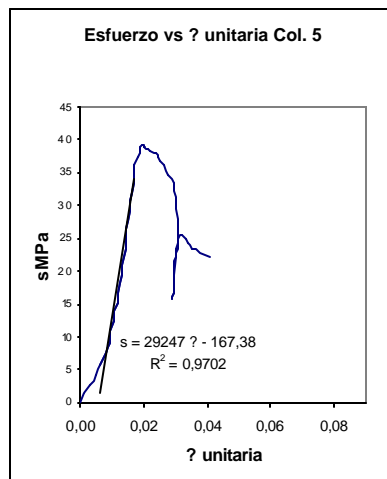
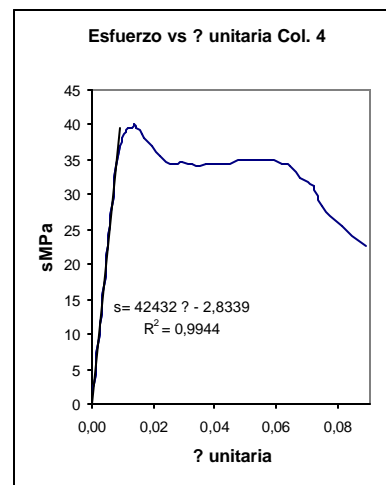
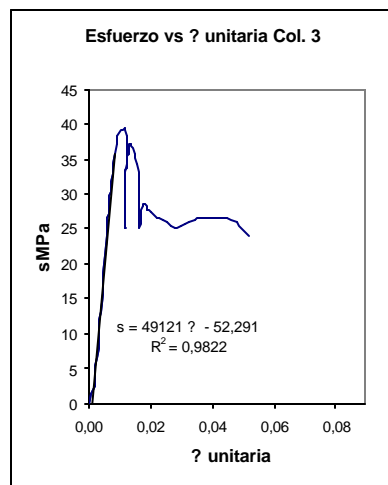
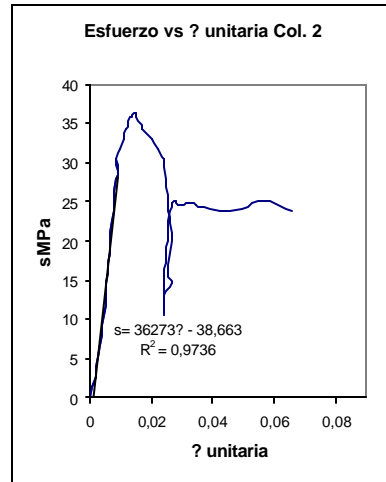
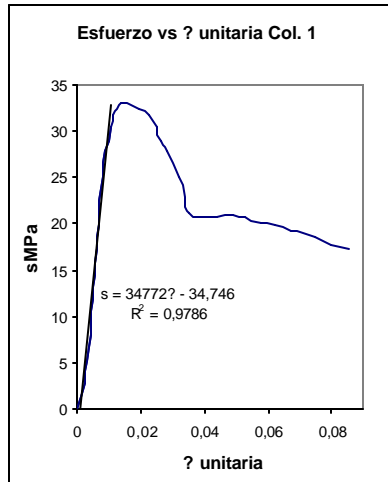
- Tablas de Esfuerzo y Deformación para las Columnas.

| COLUMNA 3 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 0         | 0      |
| 1,32      | 0,0010 |
| 2,64      | 0,0016 |
| 3,97      | 0,0020 |
| 5,29      | 0,0024 |
| 6,61      | 0,0027 |
| 7,93      | 0,0030 |
| 9,25      | 0,0033 |
| 10,58     | 0,0036 |
| 13,22     | 0,0041 |
| 15,86     | 0,0046 |
| 18,51     | 0,0049 |
| 21,15     | 0,0054 |
| 23,80     | 0,0058 |
| 26,44     | 0,0063 |
| 27,76     | 0,0066 |
| 29,09     | 0,0068 |
| 30,41     | 0,0071 |
| 31,73     | 0,0073 |
| 33,05     | 0,0076 |
| 34,37     | 0,0080 |
| 35,70     | 0,0083 |
| 37,02     | 0,0088 |
| 38,34     | 0,0095 |
| 39,40     | 0,0114 |
| 38,34     | 0,0123 |
| 37,02     | 0,0123 |
| 34,37     | 0,0123 |
| 31,73     | 0,0121 |
| 29,09     | 0,0119 |
| 26,44     | 0,0116 |
| 25,12     | 0,0114 |
| 25,12     | 0,0114 |
| 25,78     | 0,0114 |
| 26,44     | 0,0115 |
| 27,10     | 0,0116 |
| 27,76     | 0,0116 |
| 28,42     | 0,0116 |
| 29,09     | 0,0117 |
| 29,75     | 0,0118 |
| 30,41     | 0,0119 |
| 31,07     | 0,0119 |
| 31,73     | 0,0120 |
| 32,39     | 0,0121 |
| 33,05     | 0,0122 |
| 33,71     | 0,0123 |
| 34,37     | 0,0124 |
| 35,03     | 0,0126 |
| 35,70     | 0,0128 |
| 36,36     | 0,0131 |
| 37,02     | 0,0139 |
| 35,70     | 0,0148 |
| 34,37     | 0,0154 |
| 31,73     | 0,0161 |
| 29,09     | 0,0166 |

| COLUMNA 3 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 27,76     | 0,0167 |
| 26,44     | 0,0167 |
| 25,12     | 0,0167 |
| 25,78     | 0,0168 |
| 26,44     | 0,0169 |
| 27,10     | 0,0171 |
| 28,42     | 0,0173 |
| 28,56     | 0,0184 |
| 27,76     | 0,0192 |
| 27,50     | 0,0202 |
| 26,71     | 0,0217 |
| 26,44     | 0,0226 |
| 26,18     | 0,0241 |
| 25,78     | 0,0255 |
| 25,38     | 0,0268 |
| 25,25     | 0,0281 |
| 25,38     | 0,0297 |
| 25,65     | 0,0312 |
| 25,91     | 0,0324 |
| 26,18     | 0,0341 |
| 26,44     | 0,0360 |
| 26,71     | 0,0397 |
| 26,44     | 0,0445 |
| 25,78     | 0,0481 |
| 23,80     | 0,0519 |

| COLUMNA 5 |        |
|-----------|--------|
| s Mpa     | ?      |
| 0         | 0      |
| 1,39      | 0,0015 |
| 2,78      | 0,0032 |
| 4,17      | 0,0050 |
| 5,56      | 0,0062 |
| 6,95      | 0,0074 |
| 8,34      | 0,0084 |
| 9,72      | 0,0092 |
| 11,11     | 0,0097 |
| 12,50     | 0,0104 |
| 13,89     | 0,0110 |
| 15,28     | 0,0115 |
| 16,67     | 0,0120 |
| 18,06     | 0,0125 |
| 19,45     | 0,0130 |
| 20,84     | 0,0134 |
| 22,23     | 0,0139 |
| 23,62     | 0,0141 |
| 25,01     | 0,0144 |
| 26,40     | 0,0148 |
| 27,79     | 0,0151 |
| 29,17     | 0,0154 |
| 30,56     | 0,0159 |
| 31,95     | 0,0162 |
| 33,34     | 0,0166 |
| 34,73     | 0,0170 |
| 36,12     | 0,0173 |
| 37,51     | 0,0180 |
| 38,21     | 0,0183 |
| 38,90     | 0,0190 |
| 39,18     | 0,0195 |
| 39,04     | 0,0201 |
| 38,90     | 0,0204 |
| 38,62     | 0,0209 |
| 38,34     | 0,0218 |
| 37,93     | 0,0242 |
| 37,51     | 0,0245 |
| 36,82     | 0,0254 |
| 36,12     | 0,0269 |
| 34,73     | 0,0282 |
| 33,34     | 0,0292 |
| 30,56     | 0,0302 |
| 25,01     | 0,0305 |
| 22,23     | 0,0302 |
| 19,45     | 0,0299 |
| 16,67     | 0,0295 |
| 15,84     | 0,0291 |
| 16,67     | 0,0292 |
| 18,06     | 0,0294 |
| 19,45     | 0,0296 |
| 20,84     | 0,0297 |
| 22,23     | 0,0300 |
| 23,62     | 0,0303 |
| 25,01     | 0,0309 |
| 25,56     | 0,0317 |
| 25,01     | 0,0330 |
| 24,31     | 0,0341 |
| 23,62     | 0,0352 |
| 22,23     | 0,0408 |

## Curvas de Esfuerzo vs Deformación y Líneas de Tendencia en la Zona Elástica



Tablas de Carga y Deflexión para las Vigas

| VIGA 1 |        |
|--------|--------|
| P KN   | e      |
| 0      | 0      |
| 0,4    | 1,270  |
| 0,6    | 2,184  |
| 1      | 3,810  |
| 1,5    | 5,258  |
| 2      | 7,137  |
| 2,5    | 9,093  |
| 3      | 11,024 |
| 3,5    | 12,852 |
| 4      | 14,808 |
| 4,5    | 17,043 |
| 5      | 20,041 |
| 5,5    | 23,368 |
| 5,8    | 28,956 |
| 3,8    | 33,071 |
| 3,9    | 36,347 |
| 4      | 37,490 |
| 4,2    | 39,243 |
| 4,4    | 42,316 |
| 4,6    | 45,771 |
| 4,7    | 50,673 |
| 2,5    | 53,086 |
| 1,8    | 58,572 |

| VIGA 2 |        |
|--------|--------|
| P KN   | e      |
| 0      | 0      |
| 0,2    | 0,495  |
| 0,4    | 1,054  |
| 0,6    | 1,588  |
| 0,8    | 2,197  |
| 1      | 2,642  |
| 1,2    | 3,124  |
| 1,4    | 3,658  |
| 1,6    | 4,153  |
| 1,8    | 4,699  |
| 2      | 5,207  |
| 2,2    | 5,664  |
| 2,4    | 6,248  |
| 2,6    | 6,807  |
| 2,8    | 7,391  |
| 3      | 8,026  |
| 3,2    | 8,649  |
| 3,4    | 9,322  |
| 3,6    | 10,160 |
| 3,8    | 10,795 |
| 4      | 11,328 |
| 4,2    | 12,217 |
| 4,4    | 13,106 |
| 4,6    | 13,983 |
| 4,8    | 14,834 |
| 5      | 15,875 |
| 5,2    | 16,662 |
| 5,4    | 17,805 |
| 5,6    | 19,355 |
| 5,8    | 21,260 |
| 6      | 23,292 |
| 6,2    | 26,492 |
| 6,25   | 32,207 |
| 6,25   | 37,973 |
| 5,4    | 38,862 |
| 5,6    | 42,088 |
| 5,75   | 49,987 |
| 5,8    | 52,832 |
| 5,7    | 59,106 |
| 5,6    | 67,564 |

| VIGA 3 |        |
|--------|--------|
| P KN   | e      |
| 0      | 0      |
| 0,2    | 0,305  |
| 0,4    | 1,092  |
| 0,6    | 1,473  |
| 0,8    | 1,829  |
| 1      | 2,159  |
| 1,2    | 2,477  |
| 1,4    | 2,870  |
| 1,6    | 3,213  |
| 1,8    | 3,556  |
| 2      | 3,912  |
| 2,2    | 4,331  |
| 2,4    | 4,750  |
| 2,6    | 5,258  |
| 2,8    | 5,753  |
| 3      | 6,198  |
| 3,2    | 7,010  |
| 3,4    | 7,239  |
| 3,6    | 7,645  |
| 3,8    | 8,331  |
| 4      | 8,865  |
| 4,2    | 9,284  |
| 4,4    | 10,338 |
| 4,6    | 11,049 |
| 4,8    | 12,014 |
| 5      | 13,081 |
| 5,2    | 14,224 |
| 5,4    | 15,342 |
| 5,6    | 16,535 |
| 5,8    | 17,653 |
| 6      | 18,936 |
| 6,2    | 20,269 |
| 6,4    | 22,047 |
| 6,6    | 23,343 |
| 6,8    | 25,578 |
| 7      | 27,635 |
| 7,2    | 30,277 |
| 7,4    | 35,560 |
| 7,5    | 39,980 |
| 7,6    | 45,720 |
| 6      | 49,124 |
| 3,5    | 51,841 |
| 2      | 54,534 |

| VIGA 4 |        |
|--------|--------|
| P KN   | e      |
| 0      | 0      |
| 0,2    | 0,381  |
| 0,4    | 0,737  |
| 0,6    | 1,092  |
| 0,8    | 1,448  |
| 1      | 1,803  |
| 1,2    | 2,108  |
| 1,4    | 2,464  |
| 1,6    | 2,769  |
| 1,8    | 3,073  |
| 2      | 3,353  |
| 2,2    | 3,734  |
| 2,4    | 4,064  |
| 2,6    | 4,394  |
| 2,8    | 4,699  |
| 3      | 5,080  |
| 3,2    | 5,334  |
| 3,4    | 5,715  |
| 3,6    | 6,071  |
| 3,8    | 6,414  |
| 4      | 6,756  |
| 4,2    | 7,163  |
| 4,4    | 7,620  |
| 4,6    | 8,001  |
| 4,8    | 8,484  |
| 5      | 9,195  |
| 5,2    | 9,754  |
| 5,3    | 10,135 |
| 5,4    | 10,439 |
| 5,5    | 10,693 |
| 5,6    | 11,024 |
| 5,7    | 11,379 |
| 5,8    | 11,836 |
| 5,9    | 11,938 |
| 6      | 12,497 |
| 6,1    | 12,827 |
| 6,2    | 13,132 |
| 6,3    | 13,513 |
| 6,4    | 13,919 |
| 6,5    | 14,351 |
| 6,6    | 14,453 |
| 6,8    | 15,367 |
| 7      | 16,053 |

| VIGA 4 |        |
|--------|--------|
| P KN   | e      |
| 7,2    | 16,967 |
| 7,4    | 18,009 |
| 7,6    | 19,177 |
| 7,8    | 20,599 |
| 8      | 22,352 |
| 8,2    | 23,927 |
| 8,2    | 25,298 |
| 8,3    | 27,381 |
| 8,4    | 28,854 |
| 8,5    | 30,734 |
| 8,6    | 33,325 |
| 8,55   | 36,932 |
| 8,58   | 40,919 |

## ANEXO F. Descripción del Proceso de Laminado

La materia prima para el proceso de laminado es Guadua Angustifolia Kunt, que previamente ha sido cortada e inmunizada bajo los estándares técnicos recomendados. La guadua a utilizar en el laminado debe ser lo mas recta posible y corresponder a la zona de la cepa y basa donde el ancho del tallo es el suficiente para obtener láminas de un significativo grosor. Esta zona corresponde aproximadamente a los 8 primeros metros de la guadua. Para el proceso de inmunización se recomienda no utilizar orificios en sentido transversal en la guadua Ver Fotografía F1, cuando la lámina va a ser utilizada para fines estructurales, donde su sollicitación a diferentes esfuerzos va a ser considerable. Los orificios en la lámina inducen zonas de debilidad. Los ensayos de la presente investigación demostraron que aquellas láminas donde existían orificios fallaban en esta zona con cargas menores a las del promedio.

Fotografía F1. Agujeros transversales en el proceso de inmunización



Para la inmunización se recomienda perforar la guadua longitudinalmente con una varilla de ½" o de mayor diámetro preferiblemente.

**Troceo** En el de proceso de troceo se unifica la longitud de las guaduas. Se puede realizar con una sierra de banco de un solo disco, una sierra radial, una sierra colilladora, sin embargo es recomendable utilizar guías para que el corte sea totalmente perpendicular y la longitud sea uniforme. Ver Fotografía F2.

Fotografía F2. Sierra Colilladora



**Aserrado** En el proceso de aserrado se obtienen las latas. Este proceso se puede se puede realizar con una sierra de banco de un solo disco, sin embargo es aconsejable utilizar una sierra paralela para que el ancho de las latas sea uniforme. Ver Fotografía F3.

Fotografía F3. Sierra paralela para aserrado



**Denudado** En el proceso de denudado se retira la parte exterior del nudo para obtener una lata plana. Este proceso se puede realizar con una sierra de banco de un solo disco, sin embargo es aconsejable utilizar una sierra paralela para retirar al mismo tiempo el sobrante de la parte interna obteniendo una lata plana por ambas caras.

**Cocción** En el proceso de cocción se blanquea las latas evitando un producto final manchado. En el proceso de cocción la guadua es depositada en una caldera con agua y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) al 2% hasta que la solución hierva.

**Secado** En el proceso de secado las latas pierden la humedad hasta llegar a un nivel inferior al 15%. Con este proceso las latas estabilizan sus dimensiones y disminuyen el ataque de hongos y xilófagos. El secado se puede llevar a cabo de diferentes formas, secado al aire, en invernaderos, en hornos, todos ellos con costos y rendimientos diferentes.

**Cepillado** En el proceso de cepillado es retirada de la lata la capa de sílice y la parte blanca interior para mejorar la adherencia. Este proceso se puede realizar en una cepilladora o planeadora, teniendo en cuenta que la sílice de las latas desgasta las cuchillas en gran medida, recomendando utilizar cuchillas de tungsteno.

**Lijado** En el proceso de lijado se calibran las dimensiones de las latas e igualmente desaparecen las imperfecciones que se pudieran presentar en la lámina aún después del proceso de cepillado. El proceso de lijado se realiza en una regruesadora, lijadora o cualquier otra máquina adaptada para tal fin (Ver fotografía F4)

Fotografía F4 Cepillado en Planeadora



Fuente: Proyecto de Latas y Laminados de Guadua<sup>24</sup>

**Aplicación de Adhesivo** En el proceso de encolado se aplica el adhesivo en las láminas de forma uniforme y con la suficiente cantidad para obtener un resultado óptimo. En el proceso de encolado se puede utilizar cualquier tipo de adhesivo (Ver Sección 1.2.3). Después del encolado las láminas son prensadas hasta que el adhesivo fragüe. Para el proceso de prensado es recomendable utilizar una prensa hidráulica para mejorar el rendimiento del proceso.

**Corrección de Dimensiones y Superficies** Después del encolado es común encontrar imperfecciones en la superficie, de igual forma las dimensiones del producto final deben ser calibradas, tanto en sección como en longitud. Para este proceso el producto es pasado por una cepilladora y posteriormente por una lijadora, el elemento es cortado según la longitud requerida con una sierra radial o una sierra colilladora.

---

<sup>24</sup> STAMM Jörg, Op., Cit. pag.73

**Manejo de Residuos** El proceso de laminados deja muchos residuos. Es indispensable tener un buen manejo de los residuos para obtener beneficios de ellos y disminuir los costos del proceso.

Los residuos del proceso pueden convertirse en combustible para los hornos utilizados en el secado, y las calderas que son usadas para la cocción.

## **PROCESO DEL LAMINADO EMPÍRICO DEL PROYECTO**

La materia prima del laminado utilizado en la investigación consistía en varas de guadua de 6 metros de la zona de la cepa y la basa. La materia fue previamente secada e inmunizada por el distribuidor.

**Troceo** Las guaduas fueron trozadas en el vivero en longitudes de 1.5m a 2 m para facilitar el transporte. El troceo se hizo con una sierra colilladora la cual no poseía guía alguna.

**Aserrado** El proceso de aserrado se hizo con una sierra de banco de un solo disco. La sección era marcada previamente, de este modo tratando de controlar el ancho de las latas y por ende la cantidad de las mismas obtenidas de una vara.

**Denudado** El proceso de denudado se realizó con la sierra de banco d un solo disco.

**Cepillado** El proceso de cepillado se realizó con la planeadora (Ver fotografía F5).

Fotografía F5 Cepillado en planeadora UIS



**Lijado** El proceso de lijado calibrado se realizó con la lijadora hechizo.

**Aplicación de Adhesivo** Para el proceso de encolado se utilizaron brochas de 1” para la aplicación del adhesivo (Ver fotografía F6). Dicho pegamento consistía en cola de origen animal la cual fue preparada en baño maría (Ver fotografía F7).

Fotografía F6. Preparación de Cola



Fotografía F7 Aplicación de Cola



**Prensado** Para el prensado se utilizó una prensa de banco ayudada por prensas manuales para un mejor resultado. Para todos los productos se manejó un tiempo de prensado mínimo de 24 horas (Ver fotografía F8)

Fotografía F8. Prensado

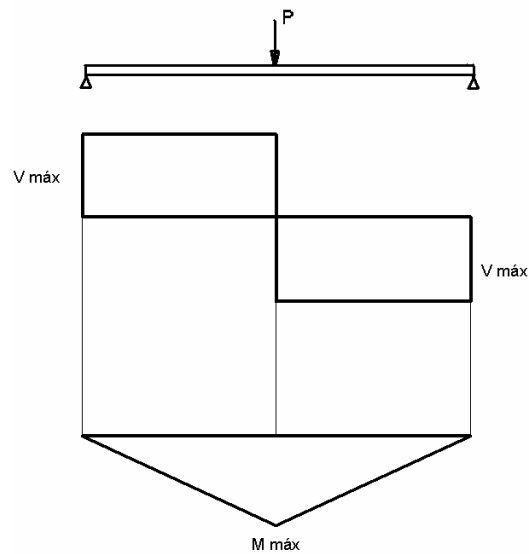


**Corrección de Dimensiones y Superficies** Para la corrección de las imperfecciones presentadas en el prensado se utilizó la planeadora en emparejando la superficie del producto final.

## ANEXO G. Cálculo de distancia mínima a zona de empalme

Para el cálculo de la distancia mínima a zona de empalme se tuvo en cuenta las condiciones de carga de los ensayos, sin embargo el método funciona para cualquier tipo de carga adaptando las ecuaciones. La carga puntual genera el diagrama de cortante y momentos mostrados en la figura G1

Figura G1. Diagrama de Cortante y Momento en Vigas



$$V_{\text{máx}} = \frac{P}{2} \quad (\text{G1})$$

$$M_{\text{Max}} = \frac{P * L}{4} \quad (\text{G2})$$

El momento en cualquier tramo de la viga se puede expresar como

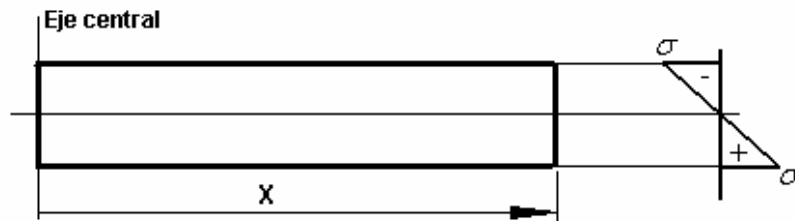
$$M = M_{\text{Max}} - \frac{P * X}{2} \quad (\text{G3})$$

Midiendo X desde el centro de la viga.

El esfuerzo en cualquier punto de la sección recta de la viga esta dado por la ecuación G4. En la Figura G2 se muestra la distribución de esfuerzos en la sección.

$$s = \frac{M * Y}{I} \quad (G4)$$

Figura G2. Elemento de Viga



El esfuerzo normal en la junta en bisel a 45° propuesta se define con la ecuación G5

$$s_N = s * \cos(45^\circ) \quad (G5)$$

El principio del método para hallar la distancia mínima de empalme consiste en asegurar la falla de la guadua antes que la falla del empalme.

Para hallar el momento máximo resistido por la viga se utiliza la ecuación G4, reemplazando Y por H/2 y el valor de s corresponde al valor  $s_{cult}$  promedio de compresión paralela a la fibra. Con la ecuación 13 se obtiene la carga ( $P_{max}$ ) que genera el momento máximo.

Con las ecuaciones G4 y G5 se halla el momento necesario para que el adhesivo falle. El esfuerzo  $s_N$  del adhesivo corresponde al promedio del  $s_N$  obtenido en

los ensayos a tracción de la cola de carpintero para el empalme longitudinal propuesto.

Para calcular la distancia mínima de empalme X desde la unión se utiliza la ecuación G6

$$X = \frac{2 * (M_{\max} - M_{\text{adhesivo}})}{P_{\max}} \quad (\text{G6})$$