



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Y LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIEROS CIVILES**

**TEMA: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-  
MECÁNICAS DEL *DENDROCALAMUS ASPER* Y PROPUESTAS DE  
VIVIENDAS NO-CONVENCIONALES PARA EL GRUPO DE FUERZAS  
ESPECIALES N° 26 “CENEP” Y LA EMPRESA 3A COMPOSITES DE  
LA CIUDAD DE QUEVEDO - ECUADOR**

**AUTORES:**

**MENDEZ NAZARENO, LUIS ALBERTO**

**SOLÍS FRIAS, KEVIN RICARDO**

**DIRECTOR: GONZÁLEZ MOSQUERA, OSWALDO MAURICIO, Ph.D.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL DENDROCALAMUS ASPER Y PROPUESTAS DE VIVIENDAS NO-CONVENCIONALES PARA EL GRUPO DE FUERZAS ESPECIALES N° 26 “CENEPA” Y LA EMPRESA 3A COMPOSITES DE LA CIUDAD DE QUEVEDO – ECUADOR*” fue realizado por los señores *Mendez Nazareno, Luis Alberto* y *Solis Frias, Kevin Ricardo*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 15 de julio de 2019

Firma:

.....

**Tcnr. González Mosquera Oswaldo Mauricio, Ph.D.**  
C.C 1708586274



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, *Mendez Nazareno, Luis Alberto* y *Solís Frias, Kevin Ricardo* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL DENDROCALAMUS ASPER Y PROPUESTAS DE VIVIENDAS NO-CONVENCIONALES PARA EL GRUPO DE FUERZAS ESPECIALES N° 26 “CENEP” Y LA EMPRESA 3A COMPOSITES DE LA CIUDAD DE QUEVEDO – ECUADOR*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnico, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Sangolquí, 15 de julio de 2019

Firma:



.....  
**Mendez Nazareno Luis Alberto**  
C.C 1724349012

Firma:



.....  
**Solís Frias Kevin Ricardo**  
C.C 1723301154



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Mendez Nazareno, Luis Alberto y Solís Frias, Kevin Ricardo* autorizamos a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL DENDROCALAMUS ASPER Y PROPUESTAS DE VIVIENDAS NO-CONVENCIONALES PARA EL GRUPO DE FUERZAS ESPECIALES N° 26 “CENEPa” Y LA EMPRESA 3A COMPOSITES DE LA CIUDAD DE QUEVEDO – ECUADOR** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad

Sangolquí, 15 de julio de 2019

Firma:

**Mendez Nazareno Luis Alberto**  
C.C 1724349012

Firma:

**Solís Frias Kevin Ricardo**  
C.C 1723301154

## **DEDICATORIA**

En estas cortas líneas quiero lograr plasmar todo el fruto de mi esfuerzo profesional que he puesto en este trabajo de culminación de mi carrera universitaria. La inspiración que me ha motivado a continuar, a no parar bajo ninguna circunstancia y a quienes ahora dedico este documento son:

A Dios: Porque sin mi vida espiritual simplemente no soy nada, la fuerza que viene desde la fe es inmensa y es la que me ha ayudado ser la persona que soy hoy en día; cada momento de felicidad como de angustia han sido claves para tomar decisiones importantes en mi vida siempre confiando en la bendición celestial.

A mis padres: Sin duda después de Dios vienen mis padres, quienes son el pilar de mi familia, las personas más importantes de mi vida y a quienes hoy les dedico todo mi esfuerzo, toda mi dedicación y todos los créditos de la persona que son como hijo y como estudiante. Ellos me han inspirado a ser perseverante y a nunca rendirme ante ninguna situación, y en el peor de los casos, ellos serán quienes me acompañen en mis peores momentos. Jany y Vlady todo lo que he logrado es suyo, les amo.

A mi hermano: Quiero dedicar este logro a esa persona especial que mira mis pasos y que quiere aprenderlos porque me considera un ejemplo a seguir. Cada día le extraño más pero sé que está preparándose profesionalmente para ser mejor que yo.

A mi familia en general: Creo que con mi familia yo he ganado la lotería porque mis tíos, primos y abuelitos son los que día a día están pendientes de lo que suceda en mi vida; desde pequeño me han visto crecer, triunfar, caer y levantarme y siempre me acompañan con una sonrisa e intentan amortiguar cualquier dolor que me haya surgido. Además, sé que desde el cielo están algunos familiares muy orgullosos de lo que hoy he logrado, les amo (+Blanquita, +Luchito, +Enriquito).

***Kevin Ricardo Solís Frias***

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, quien me ha bendecido con salud y me ha dado la fortaleza necesaria durante todas las etapas de mi vida. A mi madre, María Esperanza gracias por todo el amor y la confianza incondicional que me has brindado en cada una de mis metas propuestas; solo tú has sabido inculcar en mi el mayor ejemplo de esfuerzo y valentía ante la vida.

A mis hermanas Mayani y Mery, por estar pendientes de mi cada momento y saberme dar siempre esas palabras de aliento y enseñanzas que me dan el ímpetu y el valor para seguir formándome como una gran persona; siempre las llevo en mi corazón. A ti mi Ma. Alejandra Oviedo por abrirme las puertas de tu corazón siempre serás la luz de mis días y una de las personas que más admiro gracias por llenar mi vida con tu amor y sabiduría.

A la memoria de mi madrina Mónica de Vallejo, quien me enseñó a aprovechar cada oportunidad y a expandir mis metas (siempre te recuerdo).

A mi mentor y mejor amigo Juan Carlos Tipán, por siempre mostrarme el camino correcto e impulsar mi madurez. A mi padre que a pesar de la distancia ha sabido darme un consejo en cada ocasión.

A mis sobrinos (as) Yajaira, Ma. José, Samanta y Gary, este trabajo también va dedicado para ustedes.

*Luis Alberto Mendez Nazareno.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la salud y la vida para salir adelante, para estudiar, para prepararme; gracias por la familia que dio y por el hogar en el que crecí.

A mis papitos Vlady y Jany por todos sus sabios consejos, por todo su apoyo moral y económico. Gracias a ustedes yo he tenido la oportunidad de prepararme, de estudiar en las mejores instituciones. Gracias papi y mami porque antes que un excelente profesional yo soy una gran persona con valores.

Gracias a mi hermanito por estar a mi lado, porque nunca dudó de mis conocimientos y porque siempre quiso aprender más y más de mí. Gracias a toda mi familia por sus grandes consejos, por apoyo emocional y por todas las veces que desde niño inculcaron buenos valores para ser el hombre que soy hoy en día.

Un agradecimiento muy especial a los docentes que colaboraron en esta investigación, al Tcn. Mauricio González, Ph.D por confiar en mi capacidad académica para desarrollar el presente tema, por sus conocimientos, por su profesionalismo y su tiempo. Al Ing. Francisco Navas por su apoyo en laboratorio y paciencia. Al Ing. Jorge Zúñiga por su amplio apoyo académico, por su agradable personalidad y por todo el tiempo invertido en este proyecto.

A las autoridades del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA” por proveernos del material para la investigación, por su colaboración y su confianza en nuestros conocimientos. Al Ing. Marcelino Guachambala y al Sr. Marcos de la empresa 3A Composites, por su apoyo profesional y por la colaboración personal. Al Ing. Jorge Macías de empresa CENBA por su colaboración en la preparación de los materiales de investigación.

A mis amigos Hernán, Karly, Cinty, Naty, Andy, Diana entre los más importantes por su apoyo incondicional en este gran proceso de graduación. En especial tengo que dar gracias a Luis Mendez, mi compañero de proyecto y equipo, porque sin él no se hubiese logrado este producto, por su paciencia, por su buen carácter, por su apoyo, buena vibra y por su amplia entrega y conocimiento.

***Kevin Ricardo Solís Frias***

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más profundo agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, a toda la facultad de ingeniería Civil, a mis profesores y en especial al Tcn. Oswaldo Mauricio González, Ph. D. por el tiempo invertido su esfuerzo, gestión y orientación han permitido la elaboración de un gran proyecto, al Ing. Jorge Zuñiga por apoyarnos en los momentos más difíciles y brindarnos su conocimiento técnico desinteresado con paciencia y esmero, gracias por ser un gran amigo, al Ing. Francisco Navas por los consejos y el gran apoyo durante la realización de los ensayos de laboratorio sin su ayuda no hubiera sido posible culminar eficientemente esta etapa, también quiero extender este agradecimiento al Grupo de Fuerzas Especiales N°26 y a la empresa CENBA por permitirnos usar sus instalaciones para trabajar con la materia prima.

Todo el trabajo plasmado en estas páginas no hubiera sido posible sin el gran equipo formado con mi compañero de tesis Kevin Solís, gracias hermano por tu profesionalismo, apoyo y sobre todo por toda tu amistad. Tu destreza y entusiasmo fueron vitales para cumplir cada uno de los objetivos de esta investigación, nuestro proyecto es sin duda un gran reflejo del futuro que nos espera. Gracias también a tus padres por abrirme las puertas de su hogar brindándome sabios consejos y apoyo durante todos estos meses.

A mis grandes amigos que se han convertido también en mi familia y muchas veces han aportado de manera significativa en el proyecto Andrés García, Nathaly Andino, Nataly Fajardo, Hua Lun Barrigas, Diana Oviedo, gracias por estar ser parte de esto. Finalmente quiero agradecer al resto de mis amigos y a todas las personas dentro y fuera de la universidad por su apoyo incondicional, todos son muy importantes en mi vida.

*Luis Alberto Mendez Nazareno.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORIA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACION.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICES DE TABLAS.....</b>	<b>xxi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xxvii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xl</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xli</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Formulación del problema.....	1
1.1.1. Macro.....	1
1.1.2. Meso.....	3
1.1.3. Micro.....	4
1.2. Área de influencia.....	6
1.2.1. Área de intervención.....	7
1.2.2. Área de influencia directa.....	7
1.2.3. Área de influencia indirecta.....	7
1.3. Antecedentes.....	8

1.4. Descripción del proyecto.....	12
1.5. Justificación e importancia.....	17
1.6. Proyectos relacionados.....	20
1.7. Objetivo General .....	23
1.8. Objetivos Específicos.....	24
1.9. Hipótesis.....	25
1.10. Variables de investigación .....	26
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>27</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
2.1. Introducción y definiciones.....	27
2.2. La construcción y el impacto ambiental en el mundo.....	36
2.2.1. Construcción con materiales no convencionales .....	37
2.3. Impacto del terremoto del 2016 en la construcción ecuatoriana.....	38
2.4. Especies de bambú utilizadas como material de construcción.....	40
2.5. Generalidades y morfología del <i>D. asper</i> .....	43
2.5.1. Antecedentes.....	43
2.5.2. Estructura general .....	45
2.5.3. Estructura anatómica del <i>D. asper</i> .....	47
2.5.4. Zonas de producción.....	49
2.5.5. Planificación forestal sustentable.....	53
2.5.6. Normativas y estudios relacionados con las propiedades físico-mecánicas .....	53
2.5.6.1. Características físicas .....	54

2.5.6.2. Características mecánicas .....	55
2.6. Parámetros para un óptimo desempeño mecánico-estructural de las cañas de Guadúa.....	61
2.7. Normativas internacionales referentes .....	63
2.8. Normativa Ecuatoriana.....	63
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>64</b>
<b>3. PROCESO DE EXPLOTACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DEL <i>DENDROCALAMUS ASPER</i> .....</b>	<b>64</b>
3.1. Plan de manejo técnico en plantaciones .....	64
3.1.1. Factores ambientales y de sitio .....	65
3.1.2. Preparación de sitio.....	67
3.1.3. Marcos de plantación.....	69
3.1.4. Calendario agrícola.....	70
3.1.5. Siembra o plantación .....	72
3.1.6. Estados de madurez .....	74
3.1.7. Influencia de plagas y enfermedades.....	77
3.1.8. Cosecha y transporte.....	79
3.1.8.1. Inventario de plantación o manchas naturales .....	79
3.1.8.2. Plan de corte .....	81
3.2. Aprovechamiento en plantaciones .....	85
3.2.1. Usos y beneficios .....	86
3.2.2. Problemas con el manejo del biomaterial.....	87
3.3. Actividades técnicas de explotación .....	88

3.4. Reforestación de plantaciones de <i>D. asper</i> y aspectos silvícolas relacionados .....	90
3.4.1. Áreas aptas para la reforestación .....	91
3.4.2. Propagación o reproducción del espécimen .....	91
3.4.3. Manejo forestal sostenible .....	93
3.5. Curado del culmo .....	94
3.5.1. Método de preservación tradicional .....	95
3.5.1.1. Curado en la mata .....	95
3.5.1.2. Curado por inmersión.....	96
3.5.1.3. Curado con calor.....	96
3.5.1.4. Curado con humo.....	96
3.5.1.5. Curado por encalado.....	97
3.5.2. Método de preservación con productos químicos .....	98
3.5.2.1. Preservación por el sistema de inmersión .....	99
3.5.2.2. Preservación por el sistema Boucherie .....	100
3.6. Secado y almacenado .....	102
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>105</b>
<b>4. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DEL <i>DENDROCALAMUS ASPER</i> .....</b>	<b>105</b>
4.1. Introducción .....	105
4.2. Materiales, métodos, interpretación y análisis de resultados .....	106
4.2.1. Densidad básica y contenido de humedad.....	110
4.2.1.1. Selección y preparación del material .....	111

4.2.1.2. Protocolo de ensayo.....	112
4.2.1.3. Resultados.....	114
4.2.1.4. Discusión .....	119
4.2.2. Compresión paralela a la fibra .....	120
4.2.2.1. Selección y preparación del material .....	120
4.2.2.2. Protocolo de ensayo.....	125
4.2.2.2.1. Módulo de ruptura de compresión .....	126
4.2.2.2.2. Módulo de elasticidad de compresión .....	126
4.2.2.3. Resultados.....	127
4.2.2.4. Discusión .....	132
4.2.3. Flexión perpendicular a la fibra .....	133
4.2.3.1. Selección y preparación del material .....	133
4.2.3.2. Protocolo de ensayo.....	136
4.2.3.2.1. Módulo de ruptura de flexión .....	137
4.2.3.2.2. Módulo de elasticidad de flexión .....	138
4.2.3.3. Resultados.....	138
4.2.3.4. Discusión .....	144
4.2.4. Tracción paralela a la fibra .....	145
4.2.4.1. Selección y preparación del material .....	145
4.2.4.2. Protocolo de ensayo.....	150
4.2.4.2.1. Módulo de ruptura de tracción.....	151
4.2.4.2.2. Módulo de elasticidad de tracción.....	151

4.2.4.3. Resultados.....	152
4.2.4.4. Discusión .....	159
4.2.5. Corte paralelo a la fibra.....	160
4.2.5.1. Selección y preparación del material .....	161
4.2.5.2. Protocolo de ensayo.....	164
4.2.5.2.1. Esfuerzo de corte máximo.....	165
4.2.5.2.2. Módulo de rigidez .....	166
4.2.5.3. Resultados.....	166
4.2.5.4. Discusión .....	174
4.2.6. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para cálculo estructural .....	175
4.2.6.1. Determinación de valores característicos .....	176
4.2.6.2. Determinación de los esfuerzos admisibles .....	176
4.2.6.3. Determinación de los módulos de elasticidad y rigidez .....	178
4.2.6.4. Resultados.....	178
4.3. Conclusiones .....	181
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>186</b>
<b>5. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS MODOS MECÁNICOS DEL <i>DENDROCALAMUS ASPER</i> .....</b>	<b>186</b>
5.1. Introducción .....	186
5.2. Materiales y métodos .....	187
5.2.1. Modelamiento de elementos finitos .....	187
5.2.1.1. Detalles del modelo.....	188

5.2.1.2. Condiciones de borde y propiedades geométricas .....	188
5.2.1.2.1. Propiedades físicas y mecánicas .....	190
5.2.1.3. Técnica de modelamiento elementos finitos .....	191
5.2.1.3.1. Discretización del modelo .....	192
5.2.1.3.2. Elección del tipo de elemento .....	193
5.2.1.4. Condiciones de carga .....	193
5.2.1.4.1. Compresión .....	194
5.2.1.4.2. Flexión.....	195
5.2.1.5. Método de medición de esfuerzos .....	196
5.2.1.6. Modelo óptimo de convergencia .....	197
5.2.1.6.1. Compresión .....	197
5.2.1.6.2. Flexión.....	201
5.2.2. Análisis de elementos finitos.....	204
5.2.2.1. Biomecánica del bambú ( <i>D. asper</i> ).....	204
5.2.3. Eficiencia mecánica del bambú.....	205
5.3. Resultados .....	209
5.3.1. Biomecánica del culmo de <i>D. asper</i> bajo esfuerzos de compresión .....	209
5.3.2. Biomecánica del culmo de <i>D. asper</i> bajo esfuerzos de flexión .....	209
5.3.2.1. Factores de compensación.....	210
5.3.3. Eficiencia mecánica.....	212

<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>216</b>
<b>6. PROCESO CONSTRUCTIVO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE VIVIENDAS NO CONVENCIONALES CON <i>DENDROCALAMUS ASPER</i> .....</b>	<b>216</b>
6.1. Introducción .....	216
6.2. Técnicas constructivas.....	217
6.2.1. Cimentaciones .....	217
6.2.1.1. Sistemas de Cimentación.....	218
6.2.1.2. Estructura de un cimiento .....	220
6.2.1.3. Sobrecimiento .....	221
6.2.1.4. Anclajes para sobrecimiento y el bambú.....	223
6.2.2. Cortes y tipos de juntas entre culmos de bambú.....	225
6.2.2.1. Cortes .....	225
6.2.2.2. Juntas.....	227
6.2.2.2.1. Conexiones longitudinales .....	227
6.2.2.2.2. Conexiones perpendiculares .....	230
6.2.2.2.3. Conexiones diagonales .....	231
6.2.2.2.4. Amarres, zunchos y otras uniones.....	232
6.2.3. Columnas .....	233
6.2.4. Vigas.....	236
6.2.5. Entrepisos.....	237
6.2.6. Tableros y muros estructurales.....	238
6.2.7. Recubrimientos.....	240

6.2.7.1. Uniones entre paneles .....	242
6.2.7.2. Unión cemento-tableros estructurales .....	243
6.2.8. Cubiertas .....	244
<b>6.3. Mantenimiento de las estructuras.....</b>	<b>245</b>
<b>6.4. Método de diseño estructural .....</b>	<b>246</b>
<b>6.4.1. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad compensados .....</b>	<b>246</b>
6.4.2. Coeficientes de modificación.....	<b>246</b>
6.5. Cálculo estructural de la Vivienda N°1 – Prototipo social.....	252
6.5.1. Detalles arquitectónicos .....	252
6.5.2. Carga de viento.....	253
6.5.2.1. Velocidad instantánea máxima del viento .....	253
6.5.2.2. Velocidad corregida del viento .....	254
6.5.2.3. Cálculo de la presión del viento.....	255
6.5.2.4. Resultados de cargas en barlovento y sotavento .....	257
6.5.3. Carga Sísmica.....	258
6.5.3.1. Cortante basal de diseño (V) .....	261
6.5.4. Diseño de cubierta .....	262
6.5.4.1. Tipos de celosías.....	262
6.5.4.2. Elementos de cubierta .....	264
6.5.4.3. Análisis de cargas .....	264
6.5.4.4. Control de diseño.....	266
6.5.5. Diseño de columnas.....	280

6.5.5.1. Predimensionamiento de columnas .....	280
6.5.5.2. Análisis y distribución de cargas .....	281
6.5.5.3. Tipos de columnas .....	283
6.5.5.4. Modelamiento Etabs.....	284
6.5.5.5. Control de diseño .....	287
6.5.5.6. Resumen de columnas.....	297
6.5.6. Diseño de entramados .....	297
6.5.6.1. Análisis de cargas .....	300
6.5.6.2. Control de diseño .....	301
6.5.7. Diseño de cimentaciones.....	306
6.5.7.1. Análisis de cargas y predimensionamiento .....	307
6.5.7.2. Control de diseño.....	308
6.5.7.3. Resumen de cimentación .....	315
6.5.8. Diseño del sobrecimiento (pedestal) .....	316
6.5.8.1. Control de diseño sobrecimiento .....	316
6.5.8.2. Resumen de sobrecimiento.....	320
6.5.9. Análisis estructural completo a través del modelamiento en Etabs .....	320
6.5.9.1. Análisis de participación modal.....	323
6.5.9.2. Control de deformaciones.....	324
6.5.9.3. Control de masas permanentes y sísmicas .....	328
6.6. Cálculo estructural de la Vivienda N°2 – Prototipo particular.....	330
6.6.1. Detalles arquitectónicos .....	330

6.6.2. Carga de viento.....	331
6.6.2.1. Cálculo de la presión del viento.....	332
6.6.2.2. Resultados de cargas en barlovento y sotavento .....	333
6.6.3. Carga Sísmica.....	333
6.6.3.1. Cortante basal de diseño (V) .....	334
6.6.4. Diseño de cubierta .....	335
6.6.4.1. Elementos de cubierta .....	336
6.6.4.2. Análisis de cargas .....	336
6.6.4.3. Diseño de correas (Cubiertas 1 y 2) .....	337
6.6.4.3.1. Control de diseño.....	339
6.6.4.4. Diseño de viguetas (Cubiertas 1 y 2) .....	346
6.6.4.4.1. Control de diseño.....	348
6.6.4.5. Diseño de vigas (Cubiertas 1 y 2).....	353
6.6.4.5.1. Control de diseño.....	355
6.6.4.6. Resumen de diseño de cubierta.....	361
6.6.5. Diseño de losa de entrepiso .....	362
6.6.5.1. Predimensionamiento de losa maciza .....	362
6.6.5.2. Análisis de cargas .....	363
6.6.5.3. Chequeo cortante .....	366
6.6.5.4. Análisis de nervios .....	367
6.6.5.5. Refuerzo de temperatura y retracción de fraguado .....	371
6.6.5.6. Resumen de diseño de losa de entrepiso .....	371

6.6.6. Diseño de vigas de entrepiso .....	373
6.6.6.1. Elementos de entrepiso .....	373
6.6.6.2. Análisis de cargas .....	374
6.6.6.3. Configuración de las vigas de entrepiso .....	376
6.6.6.4. Control de diseño .....	378
6.6.6.5. Conectores de corte de la viga de entrepiso con la losa de hormigón .....	391
6.6.6.6. Resumen de las vigas de entrepiso .....	392
6.6.7. Diseño de columnas .....	393
6.6.7.1. Predimensionamiento de columnas .....	393
6.6.7.2. Análisis y distribución de cargas .....	394
6.6.7.3. Tipo de columna .....	396
6.6.7.4. Modelamiento Etabs .....	397
6.6.7.5. Control de diseño .....	400
6.6.7.6. Resumen de columnas .....	406
6.6.8. Diseño de escaleras .....	407
6.6.8.1. Escalones –escaleras .....	407
6.6.8.1.1. Control de diseño .....	407
6.6.8.2. Diseño de tablón de descanso .....	414
6.6.8.2.1. Control de diseño .....	414
6.6.8.3. Diseño de Zancas (ver Figura 183) .....	416
6.6.8.3.1. Control de diseño .....	416
6.6.9. Diseño de cimentaciones .....	422

6.6.9.1. Análisis de cargas y predimensionamiento .....	423
6.6.9.2. Control de diseño .....	424
6.6.9.3. Resumen de cimentación .....	432
6.6.10. Diseño del sobrecimiento (pedestal) .....	433
6.6.10.1. Control de diseño sobrecimiento .....	433
6.6.10.2. Resumen de sobrecimiento.....	436
6.6.11. Análisis estructural completo a través del modelamiento en Etabs .....	437
6.6.11.1. Análisis de participación modal .....	438
6.6.11.2. Control de deformaciones .....	439
6.6.11.3. Control de masas permanentes y sísmicas .....	442
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>444</b>
<b>7. ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS VIVIENDAS N°1 - PROTOTIPO SOCIAL Y N°2 - PROTOTIPO PARTICULAR .....</b>	<b>444</b>
7.1. Introducción .....	444
7.2. Elaboración del presupuesto referencial .....	444
7.3. Análisis de tiempos de obra .....	447
7.4. Comparación con viviendas convencionales de características similares.....	447
7.5. Ventajas y desventajas .....	448
7.6. Maquetas arquitectónicas .....	451
<b>ANEXOS .....</b>	<b>464</b>

## ÍNDICES DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Empresas que trabajan con Dendrocalamus asper a nivel nacional.....</i>	11
<b>Tabla 2</b> <i>Investigaciones relacionadas al Dendrocalamus asper como elemento constructivo.....</i>	20
<b>Tabla 3</b> <i>Distribución geográfica del D. asper y otras especies de bambú en el Ecuador. ....</i>	51
<b>Tabla 4</b> <i>Propiedades físicas del D. asper (ensayos de contenido de humedad y densidad básica) .....</i>	56
<b>Tabla 5</b> <i>Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de compresión paralelo a la fibra). ....</i>	57
<b>Tabla 6</b> <i>Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de flexión perpendicular a la fibra). ....</i>	58
<b>Tabla 7</b> <i>Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de tracción paralelo a la fibra).....</i>	59
<b>Tabla 8</b> <i>Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de corte paralelo a la fibra). ....</i>	60
<b>Tabla 9</b> <i>Características técnicas de la caña Guadúa como elemento estructural.....</i>	61
<b>Tabla 10</b> <i>Esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad para estructuras con caña Guadúa. ....</i>	62
<b>Tabla 11</b> <i>Factores físicos requeridos para un óptimo desarrollo del D. asper .....</i>	67
<b>Tabla 12</b> <i>Control de la plantación según su estado de madurez.....</i>	80
<b>Tabla 13</b> <i>Plan de corte de los culmos maduros analizado por Ha de plantación .....</i>	84
<b>Tabla 14</b> <i>Productos químicos más utilizados para preservar el bambú .....</i>	98
<b>Tabla 15</b> <i>Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de compresión por sección del culmo.....</i>	115
<b>Tabla 16</b> <i>Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de flexión por sección del culmo .....</i>	116
<b>Tabla 17</b> <i>Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de tracción por sección del culmo .....</i>	117
<b>Tabla 18</b> <i>Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de corte por sección del culmo .....</i>	118

<b>Tabla 19</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección base <math>h=1.0</math> m)</i> .....	121
<b>Tabla 20</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección media <math>h=6.0</math> m)</i> .....	122
<b>Tabla 21</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección superior <math>h=18.0</math>)</i> .....	122
<b>Tabla 22</b> <i>Resultados promedios seccionales para el ensayo de compresión en dirección (L) del D. asper</i> .....	127
<b>Tabla 23</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección base <math>h=1.5</math>)</i> .....	134
<b>Tabla 24</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección media <math>h=6.0</math>)</i> .....	134
<b>Tabla 25</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección superior <math>h=18.0</math>)</i> .....	134
<b>Tabla 26</b> <i>Resultados promedios seccionales para el ensayo de flexión en dirección (R) del D. asper</i> .....	139
<b>Tabla 27</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección base <math>h=1.5</math> m)</i> .....	147
<b>Tabla 28</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección media <math>h=6.0</math> m)</i> .....	147
<b>Tabla 29</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección superior <math>h=18.0</math> m)</i> .....	148
<b>Tabla 30</b> <i>Resultados promedios seccionales para el ensayo de tracción en dirección (L) del D. asper</i> .....	152
<b>Tabla 31</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de corte (sección base <math>h=1.0</math> m)</i> .....	162
<b>Tabla 32</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de corte (sección media <math>h=6.0</math> m)</i> .....	162
<b>Tabla 33</b> <i>Dimensionamiento de las probetas de corte (sección superior <math>h=18.0</math> m)</i> .....	163
<b>Tabla 34</b> <i>Resultados promedios seccionales para el ensayo de corte en dirección (L) del D. asper</i> .....	167
<b>Tabla 35</b> <i>Cálculo del valor característico para los modos mecánicos analizados en el D. asper bajo la normativa ISO 22156:2004</i> .....	179
<b>Tabla 36</b> <i>Cálculo de los esfuerzos admisibles para los modos mecánicos analizados en el D. asper bajo las normativas ISO 22156:2004 y NSR-10 (AIS, 2010)</i> .....	180

<b>Tabla 37</b> <i>Módulos de elasticidad y de rigidez (MOE &amp; G) para los respectivos modos mecánicos analizados en el D. asper bajo la NSR-10 (AIS, 2010)</i> .....	181
<b>Tabla 38</b> <i>Esfuerzos admisibles de los modos mecánicos ensayados en la sección media nodal del D. asper</i> .....	184
<b>Tabla 39</b> <i>Módulos de elasticidad y de rigidez calculados para la sección media nodal del D. asper</i> .....	185
<b>Tabla 40</b> <i>Carga aplicada en los modelos de elementos finitos para cada modo mecánico</i> .....	196
<b>Tabla 41</b> <i>Resultados del estudio de convergencia para el modo mecánico de compresión</i> .....	198
<b>Tabla 42</b> <i>Resultados del estudio de convergencia para el modo mecánico de flexión</i> .....	201
<b>Tabla 43</b> <i>Factores de compensación calculados para los prototipos en investigación</i> .....	211
<b>Tabla 44</b> <i>Datos para el cálculo de eficiencia mecánica</i> .....	212
<b>Tabla 45</b> <i>Resultados de eficiencia mecánica para probetas de D. asper</i> .....	212
<b>Tabla 46</b> <i>Energía de producción y polución liberada por elementos tradicionales de la construcción</i> .....	216
<b>Tabla 47</b> <i>Valores mínimos para dimensiones, resistencia de materiales y refuerzo de cimentaciones.</i> .....	221
<b>Tabla 48</b> <i>Capas de preservación para placas de anclaje.</i> .....	225
<b>Tabla 49</b> <i>Comparación de columnas equivalentes de distinto material</i> .....	235
<b>Tabla 50</b> <i>Tipos de revestimiento para estructuras modulares de bambú y madera</i> .....	241
<b>Tabla 51</b> <i>Optimización de la vida útil en elementos constituidos por bambú</i> .....	245
<b>Tabla 52</b> <i>Propiedades físico-mecánicas de diseño del D. asper</i> .....	246
<b>Tabla 53</b> <i>Coeficiente de modificación por duración de carga</i> .....	248
<b>Tabla 54</b> <i>Coeficiente de modificación por contenido de humedad</i> .....	248
<b>Tabla 55</b> <i>Coeficiente de modificación por temperatura</i> .....	249

<b>Tabla 56</b> <i>Coefficiente de modificación por estabilidad de vigas</i> .....	250
<b>Tabla 57</b> <i>Coefficiente de modificación por cortante</i> .....	251
<b>Tabla 58</b> <i>Coefficiente de corrección <math>\sigma</math></i> .....	254
<b>Tabla 59</b> <i>Coefficiente de entorno altura (<math>C_e</math>)</i> .....	256
<b>Tabla 60</b> <i>Coefficiente de forma (<math>C_f</math>)</i> .....	256
<b>Tabla 61</b> <i>Coefficiente de modificación por altura</i> .....	257
<b>Tabla 62</b> <i>Resultados de carga horizontal (presión del viento) en columnas y cubiertas</i> .....	258
<b>Tabla 63</b> <i>Espectro elástico de diseño en aceleraciones (NEC-SE-DS, 2015)</i> .....	259
<b>Tabla 64</b> <i>Espectro de diseño por el Método 1 basado en fuerzas (D.B.F.)</i> .....	260
<b>Tabla 65</b> <i>Chequeo del sistema estructural e inclinación de las celosías</i> .....	264
<b>Tabla 66</b> <i>Resumen de los miembros cargados de la celosía monopitch tipo I</i> .....	269
<b>Tabla 67</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen</i> .....	270
<b>Tabla 68</b> <i>Coefficiente de longitud efectiva</i> .....	271
<b>Tabla 69</b> <i>Clasificación de columnas por esbeltez</i> .....	272
<b>Tabla 70</b> <i>Resumen de los miembros cargados de la celosía monopitch tipo II</i> .....	277
<b>Tabla 71</b> <i>Resumen de los miembros cargados de la celosía howe</i> .....	279
<b>Tabla 72</b> <i>Peso propio de las celosías</i> .....	281
<b>Tabla 73</b> <i>Clasificación de las columnas por carga axial en el prediseño</i> .....	282
<b>Tabla 74</b> <i>Propiedades geométricas de las configuraciones de 3 y 4 culmos</i> .....	284
<b>Tabla 75</b> <i>Porcentaje de participación de masas de la estructura</i> .....	286
<b>Tabla 76</b> <i>Carga Axial y Momento actuante en columnas</i> .....	289
<b>Tabla 77</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen</i> .....	290

<b>Tabla 78</b> <i>Resumen del tipo de columna y su configuración para la vivienda N°1</i> .....	297
<b>Tabla 79</b> <i>Carga proveniente de cubiertas y armadura de celosías</i> .....	300
<b>Tabla 80</b> <i>Análisis de cargas de los entramados de cada pared de la vivienda</i> .....	300
<b>Tabla 81</b> <i>Propiedades geométricas de un culmo de bambú</i> .....	301
<b>Tabla 82</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación para entramados</i> .....	302
<b>Tabla 83</b> <i>Resumen del tipo de cimiento y su armado para la vivienda N°1</i> .....	315
<b>Tabla 84.</b> <i>Condiciones de elementos sin esbeltez</i> .....	316
<b>Tabla 85</b> <i>Cargas para la estructura en Etabs</i> .....	322
<b>Tabla 86</b> <i>Combinaciones de cargas para el análisis del comportamiento estructural</i> .....	322
<b>Tabla 87</b> <i>Coefficiente <math>C_t</math> y <math>\alpha</math></i> .....	323
<b>Tabla 88</b> <i>Valores de <math>\Delta M</math> máximas expresados como fracción de la altura de piso</i> .....	324
<b>Tabla 89</b> <i>Lista de materiales por nivel de la vivienda N°1</i> .....	328
<b>Tabla 90</b> <i>Auto-sísmica por coeficientes de usuario</i> .....	329
<b>Tabla 91</b> <i>Resultados de carga horizontal (presión del viento) en cubiertas</i> .....	333
<b>Tabla 92</b> <i>Espectro elástico de diseño en aceleraciones (NEC-SE-DS, 2015)</i> .....	334
<b>Tabla 93</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen</i> .....	357
<b>Tabla 94</b> <i>Resumen de los elementos que conforman la cubierta 1 y 2 de la vivienda N°2</i> .....	361
<b>Tabla 95</b> <i>Tabla de Fracción de carga</i> .....	364
<b>Tabla 96</b> <i>Diseño y armado del nervio 1</i> .....	368
<b>Tabla 97</b> <i>Diseño y armado del nervio 2</i> .....	368
<b>Tabla 98</b> <i>Diseño y armado del nervio 3</i> .....	369
<b>Tabla 99</b> <i>Diseño y armado del nervio 4</i> .....	369

<b>Tabla 100</b> <i>Diseño y armado del nervio 5</i> .....	370
<b>Tabla 101</b> <i>Diseño y armado del nervio 6</i> .....	370
<b>Tabla 102</b> <i>Armado de la losa de entrepiso en función de los momentos positivos y negativos</i> ..	371
<b>Tabla 103</b> <i>Dimensiones de vigas en sentido horizontal con áreas cooperantes</i> .....	376
<b>Tabla 104</b> <i>Dimensiones de vigas en sentido vertical con áreas cooperantes</i> .....	377
<b>Tabla 105</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen</i> .....	382
<b>Tabla 106</b> <i>Resumen del tipo de viga de entrepiso y su configuración estructural para la vivienda N°2</i> .....	392
<b>Tabla 107</b> <i>Clasificación de las columnas por carga axial en el prediseño</i> .....	395
<b>Tabla 108</b> <i>Propiedades geométricas de la configuración de 9 culmos</i> .....	397
<b>Tabla 109</b> <i>Porcentaje de participación de masas de la estructura</i> .....	399
<b>Tabla 110</b> <i>Carga axial y momento actuante en columnas</i> .....	401
<b>Tabla 111</b> <i>Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen</i> .....	402
<b>Tabla 112</b> <i>Resumen del tipo de columna y su configuración para la vivienda N°2</i> .....	406
<b>Tabla 113</b> <i>Resumen del tipo de cimiento y su armado para la vivienda N°2</i> .....	432
<b>Tabla 114</b> <i>Lista de Materiales por nivel de la vivienda N°2</i> .....	442
<b>Tabla 115</b> <i>Auto-sísmica por coeficientes de usuario para la vivienda N°2</i> .....	443
<b>Tabla 116</b> <i>Presupuesto y tiempo referencial de la vivienda N°1 – Prototipo social</i> .....	445
<b>Tabla 117</b> <i>Presupuesto y tiempo referencial de la vivienda N°2 – Prototipo particular</i> .....	446
<b>Tabla 118</b> <i>Comparación de viviendas propuestas con D. asper con otras de características similares</i> .....	447

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Marco regional para el desarrollo del proyecto de investigación (a) Ubicación del cantón Quevedo, (b) Ubicación de la provincia de Los Ríos en el Ecuador, y (c) Ubicación de la parroquia y el lugar de análisis.....	13
<b>Figura 2.</b> Líneas isotérmicas del Ecuador .....	14
<b>Figura 3.</b> Isoyetas o isolíneas del Ecuador .....	15
<b>Figura 4.</b> Velocidades del viento (30 m sobre el suelo) Ecuador.....	15
<b>Figura 5.</b> Estructura de un culmo de bambú .....	42
<b>Figura 6.</b> División de la familia del <i>D. asper</i> .....	44
<b>Figura 7.</b> Morfología general de la especie <i>D. asper</i> (a) semillas, dimensiones de 3.5 a 5.0 mm de largo, (b) rizoma con alturas de 0,80 m a 1,00 m en edad adulta, (c) hoja adulta de la especie (0,30-0,45) m de longitud, (d) nuevo brote con alturas aproximadas a 70 cm, (e) culmo y follaje de la planta de bambú, y (f) vista total del conjunto de bambúes .....	46
<b>Figura 8.</b> Características internas del tallo de bambú (a) vista frontal interna del canuto, (b) corte transversal de un culmo y medición diametral exterior, (c) vista longitudinal interna del canuto, y (d) espesor de la pared de un culmo.....	47
<b>Figura 9.</b> Estructura vascular interna de una muestra de <i>D. asper</i> (vista superior) especificando (a) corte tangencial de una muestra del culmo, (b) variación de haces vasculares: pared externa roja y pared interna azul; y, (c) aumento del corte dónde se observa la parénquima medular con: 1) vasos de meta xilema, 2) floema, 3) protoxilema, 4) tejido esclerenquimático, y 5) tejido parenquimático .....	48
<b>Figura 10.</b> Distribución fibrovascular de una muestra de <i>D. asper</i> (vista frontal) especificando (a) corte longitudinal de una muestra del culmo, (b) Configuración de paquetes fibrovasculares, y (c) Vista aumentada de una fibra fragmentada. ....	49
<b>Figura 11.</b> Fases lunares y su influencia en las plantaciones .....	71
<b>Figura 12.</b> Métodos de siembra del <i>D. asper</i> (a) plantaciones en bolsa, (b) plantación a raíz desnuda, y (c) plantaciones en segmentos de tallo .....	73

<b>Figura 13.</b> Estados de madurez del <i>D. asper</i> (a) renuevo o rebrote, (b) tierno o verde, (c) maduro o hecho, y (d) seco .....	76
<b>Figura 14.</b> Las plagas más comunes que afectan al <i>D. asper</i> .....	78
<b>Figura 15.</b> Identificación de los culmos de <i>D. asper</i> según su estado de madurez (método de cintas) .....	80
<b>Figura 16.</b> Identificación de los culmos de <i>D. asper</i> según su estado de madurez (método aerosol).....	81
<b>Figura 17.</b> Indicadores a considerar en el ciclo de corte .....	82
<b>Figura 18.</b> Medidas de control para optimizar los recursos en intensidad de corte para una plantación del <i>D. asper</i> .....	83
<b>Figura 19.</b> Consideraciones necesarias para una correcta metodología de trabajo durante el corte del <i>D. asper</i> .....	83
<b>Figura 20.</b> Técnicas de corte en los tallos de <i>D. asper</i> (a) buen corte, con terminación sobre el nudo, y (b) mal corte, vulnerable a pudrición por empoce de agua .....	85
<b>Figura 21.</b> Clasificación de las partes comerciales del <i>D. asper</i> según su edad y utilidad dentro del mercado .....	87
<b>Figura 22.</b> Limpieza de vegetación asociada para el óptimo crecimiento del bambusal .....	89
<b>Figura 23.</b> Parámetros a seguir para prevenir el ataque de plagas y enfermedades en una plantación del <i>D. asper</i> .....	90
<b>Figura 24.</b> Cronología para la creación de una mancha ecológica de <i>D. asper</i> .....	91
<b>Figura 25.</b> Método de propagación por semillas .....	92
<b>Figura 26.</b> Método de propagación por segmentos de culmo .....	92
<b>Figura 27.</b> Método de propagación por cortes del rizoma .....	92
<b>Figura 28.</b> Método de propagación por chusquines .....	93
<b>Figura 29.</b> Método de propagación in vitro.....	93

<b>Figura 30.</b> Esquema de las actividades fundamentales para un Manejo forestal sostenible .....	94
<b>Figura 31.</b> Curado por encalado .....	97
<b>Figura 32.</b> Preservado por inmersión .....	99
<b>Figura 33.</b> Preservación por Boucherie simple (accionado por gravedad) .....	101
<b>Figura 34.</b> Preservación por Boucherie modificado (accionado por presión).....	102
<b>Figura 35.</b> Secado al aire de los culmos en posición de tijeras .....	103
<b>Figura 36.</b> Culmos de <i>D. asper</i> secados en horno.....	104
<b>Figura 37.</b> Cronología para la colección del biomaterial <i>D. asper</i> (a) lugar de suministro,(b) identificación del bambusal, (c) corte, (d) rotulado preliminar, y (e) transporte .....	106
<b>Figura 38.</b> Formato de campo utilizado para la recolección de culmos de <i>D. asper</i> .....	107
<b>Figura 39.</b> Procedimientos generales para el curado del <i>D. asper</i> (a) perforación de diafragmas, (b) proceso de sumersión en solución inmunizante, (c) lectura de temperatura previo al ingreso, e (d) ingreso a hornos de secado.....	108
<b>Figura 40.</b> Parámetros para la identificación de las probetas.....	109
<b>Figura 41.</b> Direcciones ortogonales en un culmo de bambú .....	110
<b>Figura 42.</b> Probetas de <i>D. asper</i> empleadas durante los ensayos físicos .....	111
<b>Figura 43.</b> Instrumentación utilizada durante los ensayos físicos (a) equipo de triaxiales cíclicos marca IPC, (b) mercurio (Hg), (c) balanza digital marca Kern PCB 1000-2, y (d) horno de convección por gravedad (0 °- 300 ° C).....	112
<b>Figura 44.</b> Dimensiones nominales de las probetas para el ensayo a compresión .....	121
<b>Figura 45.</b> Máquina de ensayos universal AMSLER FM-1033.....	123
<b>Figura 46.</b> Instrumentación para medición de deformaciones (a) galga extensométrica, y (b) puente receptor monocanal DMD-21 .....	123
<b>Figura 47.</b> Pletinas de latón en configuración radial.....	124

<b>Figura 48.</b> Ensayo de compresión paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo.....	125
<b>Figura 49.</b> Curvas esfuerzo de compresión-deformación unitaria para probetas en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo.....	128
<b>Figura 50.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de compresión (a) $MOE_L$ - densidad básica y (b) $MOR_L$ - densidad básica .....	130
<b>Figura 51.</b> Relación de propiedades mecánicas de compresión $MOR_L$ - $MOE_L$ .....	130
<b>Figura 52.</b> Tipos de falla en compresión (a) falla por delaminación parcial (DC05M), (b) falla por tensión de las fibras y parénquima (DC06B), (c) falla por delaminación total de las fibras en dirección interna (DC01M), y (d) falla por pandeo general de las fibras en dirección externa (DC11B).....	131
<b>Figura 53.</b> Dimensiones nominales de las probetas para ensayo de flexión .....	133
<b>Figura 54.</b> Vibroforo de baja frecuencia AMSLER-417 U con capacidad de 100 Tn.....	135
<b>Figura 55.</b> Aditamentos implementados en el ensayo de flexión (a) viga distribuidora de carga, y (b) monturas de carga y de apoyo .....	136
<b>Figura 56.</b> Ensayo de flexión perpendicular a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo .....	137
<b>Figura 57.</b> Curvas fuerza de flexión-desplazamiento para probetas en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo .....	140
<b>Figura 58.</b> Principios básicos de resistencia de materiales (a) esquema del momento flector máximo en una viga simplemente apoyada con dos puntos de carga, y (b) esquema de los esfuerzos de flexión producidos en un culmo de bambú .....	141
<b>Figura 59.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de flexión (a) $MOE_R$ - densidad básica y (b) $MOR_R$ - densidad básica .....	142
<b>Figura 60.</b> Relación de propiedades mecánicas de flexión $MOR_R$ - $MOE_R$ .....	143
<b>Figura 61.</b> Fractura lineal por fatiga uniforme y desgarramiento fibrovascular presentado en la probeta DF02M.....	144
<b>Figura 62.</b> Dimensiones nominales de las probetas para ensayo mecánico a tracción .....	146

<b>Figura 63.</b> Instrumental utilizado durante el ensayo de tracción (a) máquina de ensayos universales Shimadzu AGS-X de 300 kN, y (b) video extensómetro con cámara dual y plataforma Trapezium X.....	149
<b>Figura 64.</b> Aditamentos implementados en el ensayo de tracción (a) agarraderas de cuñas no desplazables, y (b) llave en “T” de cuñas planas .....	150
<b>Figura 65.</b> Ensayo de tracción paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) acercamiento de la región de falla mediante el video extensómetro ...	151
<b>Figura 66.</b> Curvas esfuerzo de tracción-deformación unitaria para probetas nodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo.....	153
<b>Figura 67.</b> Curvas esfuerzo de tracción-deformación unitaria para probetas internodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo .....	155
<b>Figura 68.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de tracción para probetas nodales (a) $MOE_L$ - densidad básica y (b) $MOR_L$ - densidad básica.....	156
<b>Figura 69.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de tracción para probetas internodales (a) $MOE_L$ - densidad básica y (b) $MOR_L$ - densidad básica.....	157
<b>Figura 70.</b> Relación de propiedades mecánicas de tracción $MOR_L$ - $MOE_L$ para probetas (a) internodales y (b) nodales. ....	158
<b>Figura 71.</b> Tipos de falla en tracción (a) propagación de plasticidad con fractura progresiva en probetas nodales (DT08MN), y (b) desprendimiento paralelo a la fibra en probetas internodales (DT03B) .....	159
<b>Figura 72.</b> Dimensiones nominales de las probetas para el ensayo de corte.....	161
<b>Figura 73.</b> Placa especial de cizallamiento o corte (configuración mariposa).....	164
<b>Figura 74.</b> Ensayo de corte paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo.....	165
<b>Figura 75.</b> Curvas esfuerzo de corte-deformación unitaria para probetas internodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo.....	168
<b>Figura 76.</b> Curvas esfuerzo de corte-deformación unitaria para probetas nodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo.....	169

<b>Figura 77.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de corte para probetas internodales (a) $G_L$ - densidad básica y (b) $\tau_{\max}$ - densidad básica .....	171
<b>Figura 78.</b> Relación de propiedades físico-mecánicas de corte para probetas nodales (a) $G_L$ - densidad básica y (b) $\tau_{\max}$ - densidad básica .....	172
<b>Figura 79.</b> Relación de propiedades mecánicas de corte $\tau_{\max}$ - $G_L$ para probetas (a) internodales y (b) nodales.....	173
<b>Figura 80.</b> Falla total por tensión de las fibras y parénquima en las probetas (a) internodales (DR01B) y (b) nodales (DR07BN) .....	174
<b>Figura 81.</b> Modelo de elementos finitos para el análisis bajo el modo mecánico de compresión (a) vista lateral y (b) vista isométrica .....	189
<b>Figura 82.</b> Modelo de elementos finitos para el análisis bajo el modo mecánico de flexión (a) vista lateral y (b) vista isométrica.....	190
<b>Figura 83.</b> Tipos de elementos finitos .....	192
<b>Figura 84.</b> Condición de carga para los FEM del modo mecánico de compresión.....	194
<b>Figura 85.</b> Condición de carga para los FEM del modo mecánico de flexión.....	195
<b>Figura 86.</b> Resultados del estudio de convergencia bajo el modo mecánico de compresión (a) $MOR_L$ – número de elementos tetraédricos tridimensionales totales y (b) desplazamiento máximo resultante dirección longitudinal – número de elementos tetraédricos tridimensionales totales .....	199
<b>Figura 87.</b> FEM óptimo seleccionado para el modo mecánico de compresión (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) distribución de esfuerzos normales de la probeta (vista isométrica), y (c) distribución de esfuerzos normales (vista lateral)..	200
<b>Figura 88.</b> Resultados de estudio de convergencia bajo el modo mecánico de flexión, (a) $MOR_R$ – número de elementos tetraédricos tridimensionales y (b) desplazamiento máximo resultante dirección radial – número de elementos tetraédricos tridimensionales .....	202
<b>Figura 89.</b> FEM óptimo seleccionado para el modo mecánico de flexión (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) distribución de esfuerzos normales de la probeta (vista isométrica), y (c) distribución de esfuerzos normales (vista lateral).....	204

<b>Figura 90.</b> Propiedades de distintos tipos de materiales, MOE en (GPa) versus la densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ). Las líneas guía identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos .....	207
<b>Figura 91.</b> Propiedades de distintos tipos de materiales, MOR (Palermo et al., 2005) versus la densidad ( $\text{Mg/m}^3$ ). Las líneas guía identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos .....	208
<b>Figura 92.</b> Falla por delaminación parcial y pandeo general de las fibras (a) modelamiento en elementos finitos, y (b) probeta ensayada en laboratorio (DC05M) .....	209
<b>Figura 93.</b> Fractura lineal por fatiga uniforme y desgarramiento fibrovascular (a) modelamiento en elementos finitos, y (b) probeta ensayada en laboratorio (DF01M) .....	210
<b>Figura 94.</b> Ubicación del índice de comportamiento ( $\text{PI}_1$ ) en la gráfica de MOE (GPa) versus la densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ) .....	213
<b>Figura 95.</b> Ubicación del índice de comportamiento ( $\text{PI}_2$ ) en la gráfica de módulo de ruptura versus la densidad ( $\text{Mg/m}^3$ ) .....	214
<b>Figura 96.</b> Sistemas de cimentaciones (a) zapata aislada, (b) zapata corrida, (c) losa de cimentación, (d) pilote pre-barrenado y hormigonado, (e) cimentación mediante pilotes y solera de montaje, y (f) zapata aislada con columna de bambú.....	219
<b>Figura 97.</b> Configuración general de una cimentación para una estructura de bambú .....	221
<b>Figura 98.</b> Conexión cimiento y sobrecimiento (a) corte general de la estructura con sobrecimiento, y (b) vista isométrica de la configuración del cimiento.....	222
<b>Figura 99.</b> Tipos de anclajes para el sobrecimiento (a) anclaje mediante varillas de acero (cabezal cubierto mediante plancha metálica), y (b) anclaje mediante varillas de acero (cabezal cubierto mediante lámina de neopreno).....	224
<b>Figura 100.</b> Conformación de platinas verticales de anclaje (a) vista superior del anclaje, y (b) corte longitudinal del anclaje. ....	225
<b>Figura 101.</b> Tipologías de cortes en culmos de bambú y su forma de uso (a) cortes boca de pescado, (b) cortes punta de flauta, (c) cortes de boca recta, y (d) cortes en bisel .....	226

<b>Figura 102.</b> Junta longitudinal con madera .....	228
<b>Figura 103.</b> Junta longitudinal con placas metálicas.....	229
<b>Figura 104.</b> Junta longitudinal entre culmos .....	229
<b>Figura 105.</b> Junta transversal entre culmos .....	230
<b>Figura 106.</b> Conexiones diagonales (a) configuración tradicional, y (b) configuración con culmo de soporte .....	232
<b>Figura 107.</b> Otros tipos de uniones (a) unión tipo zuncho, y (b) unión con amarres .....	232
<b>Figura 108.</b> Estructura de una columna conformada por 9 culmos de bambú .....	234
<b>Figura 109.</b> Configuración de vigas con culmos de bambú (a) viga compuesta longitudinal, y (b) viga compuesta ortogonal .....	237
<b>Figura 110.</b> Tipos de entrepisos (a) configuración con entrepiso concreto y bambú, y (b) configuración con entrepiso entablado con bambú .....	238
<b>Figura 111.</b> Configuración de un entramado de bambú .....	239
<b>Figura 112.</b> Tipos de muros estructurales (a) muro con soleras de bambú y (b) muro con soleras de madera .....	240
<b>Figura 113.</b> Detalle de unión transversal entre tableros estructurales.....	242
<b>Figura 114.</b> Detalle de unión longitudinal entre tableros estructurales.....	243
<b>Figura 115.</b> Detalle de unión cemento- tablero estructural.....	243
<b>Figura 116.</b> Configuración de una cubierta de bambú (a) vista frontal de estructura de cubierta con viga de cumbrera, y (b) vista frontal de un alero.....	245
<b>Figura 117.</b> Propuesta de cubierta de la vivienda N° 1 .....	253
<b>Figura 118.</b> Velocidad anual media del viento a 10 m de altura.....	253
<b>Figura 119.</b> Presión del viento (barlovento y sotavento) en una vivienda. ....	255
<b>Figura 120.</b> Distribución de carga de viento por ancho cooperante en columnas y cubiertas de la vivienda N°1 (fachada lateral) .....	258

<b>Figura 121.</b> Espectro elástico y espectro reducido (diseño) graficados para el análisis sísmico de la estructura.....	261
<b>Figura 122.</b> Disposición de la cubierta de la vivienda social.....	262
<b>Figura 123.</b> Tipos de celosías para la cubierta de la vivienda social (a) celosía monopitch tipo I, (b) celosía monopitch tipo II (transición) y (c) celosía howe .....	263
<b>Figura 124.</b> Distribución de cargas en celosías analizando sus anchos cooperantes .....	265
<b>Figura 125.</b> Celosía monopitch tipo I cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural .	267
<b>Figura 126.</b> Resultados de las cargas actuantes en la celosía monopitch tipo I (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”, y (b) deformación de la estructura .....	268
<b>Figura 127.</b> Celosía monopitch tipo II cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural .	275
<b>Figura 128.</b> Resultados de las cargas actuantes en la celosía monopitch tipo II (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”, y (b) deformación de la estructura.....	276
<b>Figura 129.</b> Celosía howe cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural .....	278
<b>Figura 130.</b> Resultados de las cargas actuantes en la celosía howe (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”, y (b) deformación de la estructura.....	279
<b>Figura 131.</b> Distribución de carga sobre columnas por análisis de área cooperante .....	280
<b>Figura 132.</b> Configuración de columnas de (a) 3 culmos y (b) 4 culmos.....	284
<b>Figura 133.</b> Modelamiento estructural en Etabs (a) diseño de armadura por celosías, (b) carga de cubierta, y (c) respuesta mecánica de la estructura .....	285
<b>Figura 134.</b> Presión del viento (barlovento y sotavento) calculado en la estructura .....	287

<b>Figura 135.</b> Espectro de respuesta generado por Etabs basado en la NEC-SE-DS-2015 .....	288
<b>Figura 136.</b> Resultados de la carga actuante en la columna C1-4 .....	289
<b>Figura 137.</b> Resultados de la carga actuante en la columna C1-5 .....	293
<b>Figura 138.</b> Mampostería para la vivienda N°1 (a) estructura con entramados de bambú (b) recubrimiento de mortero y enlucido para acabado liso .....	298
<b>Figura 139.</b> Fachada de la vivienda donde se ubicarán los entramados (a) vista frontal, (b) vista posterior, (c) vista lateral derecha, y (c) vista lateral izquierda .....	299
<b>Figura 140.</b> Condición de apoyo (k) para los elementos estructurales .....	302
<b>Figura 141.</b> Esbeltez de entramados (a) en el plano y (b) fuera del plano.....	303
<b>Figura 142.</b> Cargas axiales de todas las columnas de la vivienda N°1-prototipo social.....	306
<b>Figura 143.</b> Plintos aislados para la cimentación (a) modelo real con columnas de bambú y (b) modelo equivalente con columnas de hormigón.....	307
<b>Figura 144.</b> Esquema de la fuerza actuante que se ejerce sobre el plinto y la presión del suelo en sentido contrario .....	309
<b>Figura 145.</b> Chequeo del corte unidireccional en plintos aislados .....	310
<b>Figura 146.</b> Chequeo del corte bidireccional en plintos aislados .....	312
<b>Figura 147.</b> Sector de análisis del momento flector.....	313
<b>Figura 148.</b> Condición de apoyo (k) para el sobrecimiento.....	316
<b>Figura 149.</b> Geometría del sobrecimiento de la vivienda N°1.....	317
<b>Figura 150.</b> Armado del sobrecimiento (a) corte longitudinal y (b) corte transversal.....	320
<b>Figura 151.</b> Modelamiento estructural 3D en Etabs para la vivienda N°1-prototipo social.....	321
<b>Figura 152.</b> Máximas derivas de piso para el sismo estático Ex .....	325
<b>Figura 153.</b> Máximas derivas de piso para el sismo estático Ey .....	326
<b>Figura 154.</b> Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ex .....	327

<b>Figura 155.</b> Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ey .....	327
<b>Figura 156.</b> Tableros tipo sándwich compuesto de balsa y bambú para (a) paredes exteriores (espesor=124 mm) y (b) paredes interiores (espesor=74mm) .....	331
<b>Figura 157.</b> Modelo de cubierta para la vivienda N° 2.....	331
<b>Figura 158.</b> Distribución de carga de viento en ambas cubiertas de la vivienda N°2 .....	333
<b>Figura 159.</b> Disposición de la cubierta de la vivienda N°2 (a) vista en planta y (b) vista en elevación.....	335
<b>Figura 160.</b> Armado de la estructura de cubierta.....	336
<b>Figura 161.</b> Ancho cooperante de las tejas españolas apoyadas sobre las correas (a) disposición de las tejas sobre las correas (b) área útil de colocación de teja .....	338
<b>Figura 162.</b> Esquema de Viguetas simplemente apoyada .....	340
<b>Figura 163.</b> Viga simplemente apoyada con carga distribuida (a) diagrama de cortantes y (b) diagrama de momentos .....	341
<b>Figura 164.</b> Estabilidad lateral .....	344
<b>Figura 165.</b> Ancho cooperante de las viguetas (deben coincidir con el largo útil de las tejas).....	347
<b>Figura 166.</b> Ubicación de las vigas de cubierta .....	353
<b>Figura 167.</b> Resumen gráfico de los elementos que conforman la cubierta (a) configuración de los tableros estructurales y columnas con las vigas y viguetas, (b) configuración de las vigas con las correas y con la teja .....	361
<b>Figura 168.</b> Plano arquitectónico de la losa de entrepiso vivienda N°2 .....	362
<b>Figura 169.</b> Losa de entrepiso dividida en paneles y numerada por nervios .....	365
<b>Figura 170.</b> Coeficientes en el sentido mayor y menor de cada panel de la losa .....	365
<b>Figura 171.</b> Detalle de la losa de entrepiso, corte longitudinal del (a) nervio 1-2-3 (b) nervio 4-5 y (c) nervio 6 .....	372

<b>Figura 172.</b> Elementos de la terraza ajardinada.....	373
<b>Figura 173.</b> Vista en planta de las vigas de entrepiso de la vivienda N°2.....	374
<b>Figura 174.</b> Detalle del conector de corte de la viga de entrepiso con la losa de hormigón.....	392
<b>Figura 175.</b> Configuración de las vigas de entrepiso con la losa y las columnas.....	393
<b>Figura 176.</b> Distribución de carga sobre columnas por análisis de área cooperante .....	394
<b>Figura 177.</b> Configuración de columnas de 9 culmos .....	397
<b>Figura 178.</b> Modelamiento estructural en Etabs (a) diseño de vigas, columnas y estructura de cubierta, (b) vivienda cargada con losa, y cubiertas, y (c) respuesta mecánica de la estructura .....	398
<b>Figura 179.</b> Presión del viento (barlovento y sotavento) calculado en la estructura .....	400
<b>Figura 180.</b> Resultados de la carga actuante en la columna C2-4 .....	401
<b>Figura 181.</b> Escalera fija de dos tramos para vivienda N°2.....	407
<b>Figura 182.</b> Modelo de escalón apoyado-apoyado (un escalón).....	407
<b>Figura 183.</b> Modelo de zanca.....	417
<b>Figura 184.</b> Sección del elemento asumido para zancas.....	418
<b>Figura 185.</b> Cargas axiales de todas las columnas de la vivienda N°2.....	422
<b>Figura 186.</b> Plintos aislados para la cimentación (a) modelo real con columnas de bambú y (b) modelo equivalente con columnas de hormigón .....	423
<b>Figura 187.</b> Esquema de la fuerza actuante que se ejerce sobre el plinto y la presión del suelo en sentido contrario .....	425
<b>Figura 188.</b> Detalle del chequeo del corte unidireccional en plintos aislados.....	426
<b>Figura 189.</b> Detalle del chequeo del corte bidireccional en plintos aislados.....	428
<b>Figura 190.</b> Sector de análisis del momento flector.....	430
<b>Figura 191.</b> Geometría del sobrecimiento de la vivienda N°2.....	433

<b>Figura 192.</b> Armado del sobrecimiento de la vivienda N°2 (a) corte longitudinal y (b) corte transversal .....	436
<b>Figura 193.</b> Modelamiento estructural 3D en Etabs para la vivienda N°2 - prototipo particular .....	438
<b>Figura 194.</b> Máximas derivas de piso para el sismo estático Ex .....	439
<b>Figura 195.</b> Máximas derivas de piso para el sismo estático Ey .....	440
<b>Figura 196.</b> Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ex .....	441
<b>Figura 197.</b> Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ey .....	441
<b>Figura 198.</b> Fotografías de la maqueta arquitectónica de la Vivienda N°1 – Prototipo social .....	451
<b>Figura 199.</b> Fotografías de la maqueta arquitectónica de la Vivienda N°2 – Prototipo particular .....	452

## RESUMEN

La peligrosidad sísmica del Ecuador y la reconstrucción recurrente con materiales convencionales (hormigón y acero) han provocado un crítico panorama estructural ante los constantes eventos telúricos; adicionalmente el consumo energético y el alto porcentaje de desechos sólidos contribuyen enteramente a una contaminación ambiental acelerada. La presente investigación engloba al bambú como un excelente material alternativo en la industria de la construcción, desde un ámbito ingenieril por su eficiencia mecánica y ecológicamente por su mínimo impacto ambiental. El estudio en particular pretende caracterizar física y mecánicamente al *Dendrocalamus asper* mediante ensayos de laboratorio normalizados por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y corroborados por modelamientos computacionales. Durante el proceso, se analizó 395 probetas extraídas de un bambusal procedente del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos determinando así, contenidos de humedad, densidades básicas, parámetros de compresión, corte, tracción y flexión. Los resultados reflejaron un amplio rango de ductilidad con variaciones entre el (15-20) % en sus valores modulares, adicionalmente un excelente comportamiento mecánico ante sollicitaciones estáticas y dinámicas que confirmaron la categorización común como “el acero vegetal”; razones que, permiten utilizar dichos valores para el posterior cálculo estructural en base a la teoría de esfuerzos admisibles (ASD) como aplicación final del producto investigativo. Se propone, además, un diseño habitacional no convencional sismo-resistente que responde plenamente a los requerimientos ingenieriles de construcción sostenible, con la finalidad de incentivar a entidades públicas y privadas a industrializar este biomaterial como un nuevo y competitivo elemento estructural de fácil accesibilidad en el ámbito constructivo.

## PALABRAS CLAVE

- **DENDROCALAMUS ASPER**
- **EFICIENCIA MECÁNICA**
- **CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE**
- **PROPIEDADES MECÁNICAS DEL BAMBÚ**
- **MATERIALES NO CONVENCIONALES**
- **SILVICULTURA DEL BAMBÚ**

## **ABSTRACT**

The high seismic risk of Ecuador and the recurrent reconstruction with conventional materials (concrete and steel) have provoked a critical structural panorama in the face of constant telluric events; In addition, the energy consumption and the high percentage of solid waste contribute entirely to accelerate the environmental pollution. The present investigation includes bamboo as an excellent alternative material in the construction industry, from an engineering field for its mechanical and ecological efficiency due to its minimal environmental impact. The study in particular aims to physically and mechanically characterize *Dendrocalamus asper* through standardized laboratory tests by the International Organization for Standardization (ISO) and corroborated by computational modeling. During the process, 395 specimens extracted from a bambusal from the Quevedo canton, Los Ríos province were analyzed, thus determining moisture content, basic densities and compression, shear, traction and bending parameters. The results reflected a wide range of ductility with variations between (15-20) % in their modular values, in addition to an excellent mechanical behavior against static and dynamic stresses that confirmed the common categorization as "vegetable steel"; reasons that allow the use of these values for the subsequent structural calculation based on the theory of allowable stress design (ASD) as the final application of the research. It is further proposed a seismic-resistant unconventional housing design that fully meets the engineering requirements of sustainable construction, in order to encourage public and private entities to industrialize this biomaterial as a new and competitive structural element easily accessible in the constructive area.

## **KEYWORDS**

- **DENDROCALAMUS ASPER**
- **MECHANICAL EFFICIENCY**
- **SUSTAINABLE CONSTRUCTION**
- **BAMBOO MECHANICAL PROPERTIES**
- **NON-CONVENTIONAL MATERIALS**
- **BAMBOO'S FORESTRY**

## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Formulación del problema

##### 1.1.1. Macro

A través de los años, la naturaleza se ha presentado de manera imponente mediante los eventos catastróficos que sin lugar a duda han destrozado social y económicamente a varios países en todo el mundo, tales como el terremoto de Haití en enero de 2010 o el ocurrido en Chile en febrero del mismo año, además del Tsunami en Japón en marzo de 2011, entre otros; sucesos que han permitido visualizar el importante papel que juega el diseño estructural de las edificaciones frente a estos acontecimientos (Tandazo Regalado, 2012).

Por otro lado, los desastres naturales claramente han obligado a tomar consciencia del daño que se le está haciendo al planeta en torno a la contaminación ambiental; la explotación de minas y recursos no renovables contribuyen aún más a este cambio climático que hoy en día es parte del entorno cotidiano. La industria de la construcción incurre en un 40% del consumo mundial de energía eléctrica, tomando responsabilidad del 30% de los gases nocivos y otro considerable porcentaje para desechos sólidos, debido a que la utilización de materiales convencionales en la construcción (hormigón y acero) liberan altas cantidades de CO<sub>2</sub> que son emanadas descontroladamente hacia la atmósfera (Carrillo y Alcocer, 2012).

La revisión literaria reveló que, varios países en todo el mundo han logrado establecer acuerdos para modificar los estudios sobre la influencia que tienen los sistemas constructivos tradicionales dentro del entorno ambiental (Carrillo y Alcocer, 2012).

A finales del año 2006, se introdujo como estatuto voluntario en el Reino Unido “El reglamento para viviendas sostenibles” según Seyfang (2010) y a inicios del 2008 se estableció también como reglamento para los Estados Unidos de América. Este documento legal califica seis elementos claves del diseño y construcción, enfatizando la sostenibilidad y la eficiencia estructural de las viviendas, mitigando problemas de contaminación, emisión de gases, manejo ambiental operativo antes, durante y después de su construcción; además, de la ecología propiamente analizada.

En Australia, a mediados del año 2005, el gobierno estableció el índice de sostenibilidad en edificaciones basados en el New South Wales Department of Planning (2009) para todas las viviendas nuevas de Sydney. La nueva herramienta de planeación BA-SIX (Building Sustainable Index) demanda directrices para los prototipos modernos de construcción, mismos que lograrán reducir el consumo energético en un 40% relacionado con una vivienda estándar convencional. Además, la acreditación de “Liderazgo en energía y diseño ambiental (LEED por sus siglas en inglés) ha incentivado la práctica de desarrollo en construcción ecológica, impulsando la eficacia energética y utilizando materiales del entorno local en trabajo conjunto con el reciclaje apropiado (Beatley y Newman, 2012).

Los países mencionados anteriormente, en la última década, han optado por conseguir nuevos métodos de construcción, innovando las técnicas y materiales dentro de la industria, generando viviendas de opción alternativa. Sin embargo, en países latinoamericanos siguen prevaleciendo el hormigón y el acero como materiales integrales en la construcción, cuyas técnicas constructivas no siempre son las más adecuadas, resultando así, una variedad de

edificaciones estructuralmente deficientes con altos índices de inseguridad y desconfianza; a pesar de ello, la mentalidad dirigida hacia el uso de nuevas opciones constructivas sigue siendo baja y con poca aceptación de la población, principalmente por el desconocimiento general que encapsulan mitos absurdos sobre las bondades que podrían ofrecer nuevos materiales.

Frente a lo acotado, la comunidad mundial analiza la evolución de materiales alternativos y propone estructuras con la inclusión de sistemas constructivos que sean sustentables ecológicamente a lo largo de su vida útil. Se expone también, una evolución de este tipo de obras civiles, desde lo arcaico hacia lo moderno y la manera en que los nuevos materiales adaptados a la ingeniería estructural han ido incursionando positivamente como insumo primordial amigable con el medio ambiente (Stamm, 2008).

### **1.1.2. Meso**

El cambio climático ya no es un problema a largo plazo y sus consecuencias son cada vez más frecuentes; América latina ha experimentado catástrofes naturales continuas, colocando en la lista de afectados al Ecuador, con eventos destructivos de fuerte magnitud, como sismos, el Fenómeno del Niño, lluvias torrenciales y demás; esto deja al país en un entorno de peligrosa vulnerabilidad esquemática.

Sumado al evidente riesgo natural, Ecuador enfrenta un problema social que engloba un deficiente conocimiento técnico en la construcción de viviendas, las mismas que han alcanzado ya grandes extensiones de asentamiento territorial, con modelos convencionales y no convencionales de empírica elaboración, careciendo de métodos apropiados en la estructuración, mantenimiento y seguridad, adicionalmente presentan graves falencias en sus

diseños, provocando una nula preparación ante desastres naturales que sin duda dejan grandes desgracias humanas y económicas.

El 16 de abril del 2016, en las costas ecuatorianas, se suscitó un evento sísmico causado por el movimiento de la Placa Oceánica y la Placa Continental. El primer informe de la Secretaria de Gestión de Riesgos revela que el terremoto, con epicentro en Muisne – Ecuador, tuvo una magnitud de 7,8 grados en la escala de Richter dejando 661 personas fallecidas, 12 desaparecidos, 6.274 heridos y 28.678 personas en albergues; en cuanto a las edificaciones, hubieron 10.506 afectadas en el área urbana y 8.157 en el área rural (SGR, 2016).

El suceso desencadenó la tristeza y simultáneamente la solidaridad del país, por las cuantiosas pérdidas humanas, además de ello, el sector de la construcción experimentó un gran nivel de incertidumbre debido a la cantidad de edificaciones que se destruyeron a causa del evento sísmico. Los constructores no dejan de pensar en cambios estratégicos para la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) ligados con las técnicas y criterios ingenieriles obtenidos a través de la calamitosa experiencia.

Como ingenieros civiles se acredita el deber de proteger a la ciudadanía y brindar seguridad en sus hogares, proponiendo alternativas constructivas ante movimientos telúricos impredecibles; conjuntamente se debe controlar y minimizar los efectos de la contaminación ambiental, mismos que están generando cambios climáticos severos para el entorno habitable.

### **1.1.3. Micro**

A partir del siglo XX, la región costera del Ecuador ha sufrido varios terremotos con intensidades superiores al grado V en la escala de Mercalli misma que representa un sismo de

entre 5,5 a 6,0 en la gradación Richter. Toda la región litoral presenta una vulnerabilidad sísmica preocupante y periódica desde el pasado terremoto ocurrido en abril del 2016, quedando en tela de duda la seguridad y la normativa habitacional vigente (SGR, 2016).

La reconstrucción para las áreas afectadas posterremoto, aún presentan proyectos de vivienda con materiales convencionales e indicadores demasiado elementales o inadecuados para nuestra región, volviendo a caer en el círculo de construcción empírica con materiales contaminantes y modelos clandestinos sin ningún tipo de control, que en cualquier momento colapsarán ante eventos telúricos futuros de mediana y gran magnitud.

Simultáneamente, es necesario realizar un análisis estructural intrínseco del nivel cuantitativo de viviendas existentes en los cantones de la costa pacífica, así como, de su estado cualitativo actual. Atendiendo a la nueva Constitución de la República del Ecuador, en su artículo 30, la cual sostiene que: “Las personas tienen derecho a un hábitat seguro y saludable, a una vivienda adecuada y digna con independencia de su situación social y económica”; por tanto, el Gobierno asume esta responsabilidad garantizando las características inherentes para el cumplimiento de esta Ley, controlando a su vez, el déficit habitacional que según el MIDUVI (2015) alcanza una cifra total estimada de 2’742.247 viviendas.

Ante la situación citada, el Gobierno Nacional ha canalizado su búsqueda por proyectos de construcción con materiales alternativos que brinden soluciones estructurales sísmicamente seguras, amigables con el medio ambiente y de bajo costo. Para la realización de dichos proyectos será necesario modificar la construcción tradicional mediante el empleo de biomateriales, consolidando así, una solución estructuralmente competente ante los

requerimientos tanto del Gobierno como de la ciudadanía beneficiada, además de garantizar la seguridad integral de las familias ante catástrofes naturales futuras.

Como ejemplo práctico, la presente investigación ha enfocado su área de estudio en la problemática del déficit habitacional para los miembros de las Fuerzas Armadas Ecuatorianas, quiénes deberían contar con viviendas adecuadas para asentarse solos o con sus familias durante la estadía laboral en el grupo militar establecido, en este caso, El Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, acantonado en Quevedo, institución que desafortunadamente no dispone de las viviendas necesarias para abastecer a la totalidad de su personal militar.

Cabe recalcar en este punto, que la empresa 3A Composites, localizada también en la ciudad de Quevedo, requiere de proyectos de construcción no-convencional que permitan dinamizar la industrialización de los biomateriales que produce la empresa y solidificar el marco técnico investigado en el presente estudio; su colaboración será de alta relevancia en razón que, una de las propuestas habitacionales será construida de manera inmediata a la finalización de ésta investigación, permitiendo probar de manera real las bondades que representa el construir con biomateriales en términos de seguridad, confortabilidad, y requerimientos mecánico-estructurales.

## **1.2. Área de influencia**

El Ecuador registra una larga historia de eventos con alta actividad sísmica; el país aún trabaja en realizar una conciencia real del peligro que esto representa; es por ello que, de manera general el proyecto de investigación pretende viabilizar una solución acertada en el ámbito de la construcción habitacional, que se enfoque exclusivamente a lugares de alto riesgo sísmico, de tal

modo que garantice una vivienda digna y segura ante catástrofes naturales, tomando como referencia el terremoto del 16 de abril del 2016 que durante su paso dejó en evidencia a la costa ecuatoriana y específicamente a las provincias de Esmeraldas, Manabí, Los Ríos, Santa Elena y Guayas como sectores de alta vulnerabilidad.

### **1.2.1. Área de intervención**

Industria de la construcción y desarrollo sostenible

### **1.2.2. Área de influencia directa**

Geográficamente la zona de estudio será ejecutada dentro de las instalaciones del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, cuyo terreno se encuentra en la Hda. "La Florida", localizada en el Km 2 de la vía Quevedo - Sto. Domingo, ubicada en la parroquia urbana Nicolás Infante Díaz del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos; con coordenadas 0° 59' 58" latitud Sur y 79° 28' 04" longitud Oeste, catalogada como una zona de alta vulnerabilidad sísmica cercana a la región costera. Adicionalmente, el estudio también abarcará la zona de la empresa 3A Composites, ubicada en la misma ciudad de Quevedo, acotando que la misma proporcionará apoyo en lo que corresponde al desarrollo del estudio y a la construcción de uno de los prototipos de vivienda por proponerse.

### **1.2.3. Área de influencia indirecta**

El prototipo habitacional tiene la finalidad de ser un referente en la construcción, con implicaciones de carácter sostenible, social y práctico que, debido a su funcionalidad óptima y ventajas constructivas superiores influenciarán sobre obras colindantes. Este proceso posteriormente dará lugar a una posible industrialización de alta cobertura, utilizando el

material de estudio avalado por las tecnologías pertinentes y mejoradas de acuerdo a las necesidades habitacionales de la región.

### **1.3. Antecedentes**

Los países de América del sur, son naciones que se han caracterizado por implementar nuevas tecnologías después de pasar por un fenómeno natural, es decir, el aprendizaje posterior a la adversidad; por ello el desarrollo de nuevas estructuras, específicamente en el Ecuador, ha ido avanzando paulatinamente. El terremoto del pasado 16 de abril del 2016, evidenció algunas fallas en los procesos constructivos de las estructuras convencionales de la costa del país; sentando un precedente para pensar en la innovación y el uso de nuevos materiales menos destructivos y sustentables con el medio ambiente.

La factura social que debió pagar el Estado Ecuatoriano fue relativamente alta, debido a las desafortunadas pérdidas humanas e innumerables viviendas colapsadas, que sin duda dejaron a cientos de familias en busca de un hogar. Las autoridades, pobladores y profesionales radicados en la costa del país tomaron cartas en el asunto, en cuanto a las futuras construcciones y el grado de vulnerabilidad que representan las mismas ante un riesgo sísmico que se podría repetir años más tarde.

Por otro lado, la contaminación ambiental está llegando a tales extremos en el mundo, que el hombre parece estar destruyendo el entorno natural aceleradamente; y mientras que, en otros países se han tomado medidas de prevención, control y mitigación de la contaminación, en nuestro país no existen suficientes acciones pertinentes al caso (Tandazo Regalado, 2012).

Con lo expuesto es importante recalcar que, para implementar nuevas tecnologías estructurales, que a su vez ayuden a mitigar los agentes contaminantes, se requiere de un modelo funcional que cumpla con los estándares de comodidad y seguridad mejorando la calidad de vida de las personas; bajo esta premisa, el Gobierno Nacional analiza la situación habitacional crítica por la que están pasando los pobladores y damnificados de las regiones afectadas.

Adicionalmente, el Ministerio de Defensa ha presentado al Estado la difícil situación de vivienda fiscal que atraviesan las diferentes entidades militares del país, quienes también afectados por el desastre natural del 2016, incrementaron el déficit en la infraestructura de sus destacamentos afectando el desenvolvimiento institucional y familiar.

Atendiendo a ambas problemáticas el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) en acciones conjuntas con las entidades mencionadas previamente, incursionan por buscar proyectos habitacionales dirigidos a suplir una necesidad de vivienda insatisfecha. Por tal motivo, se propone un prototipo piloto de vivienda sostenible adaptado a la zona geográfica, con un bajo impacto ambiental, en vista que todos estos parámetros son parte de una necesidad fundamental que requiere el personal militar y sus familias. A la par, esta innovación planea proyectarse hacia las localidades afectadas posterremoto, teniendo en suma consideración la vulnerabilidad sísmica de la región litoral. Finalmente, 3A Composites, empresa dedicada a la producción y comercialización de nuevos materiales mediante la aplicación de numerosas técnicas de procesamiento, apuntó su interés por apoyar el desarrollo del presente proyecto, proponiendo la materialización inmediata a escala real de uno de los prototipos de vivienda en sus instalaciones

demonstrando así, la visión futurista de trabajar con biomateriales y reflejar sus ventajas mecánico-estructurales.

Dentro de las instituciones militares se ha analizado el deterioro inmobiliario de las mismas y se determinó que la mayoría de estos han cumplido su vida útil, es decir, más de 40 años en unos casos y más de 60 años en otros, depreciándose casi en su totalidad (F. A. E. Comando Conjunto, 2012).

Actualmente la industria de la construcción presenta gran variedad de alternativas estructurales, enfocadas tanto en el diseño y el uso de materiales, así como en el desarrollo de técnicas constructivas y de preservación. En este contexto, la capacidad productiva en el Ecuador relacionada con el uso de la caña de bambú, a más de ser una excelente alternativa estructural, brinda un mejor control ante la contaminación ambiental, ya que es un material sustentable con el medio ambiente; por tal motivo, el diseño e implementación de estructuras no convencionales con caña de bambú engloba una relevancia técnica y necesaria en el país.

En base a lo señalado anteriormente, la especie de bambú conocida como *Dendrocalamus asper* lograría proyectarse como una solución óptima y con alta demanda. El uso de este material en la construcción se remonta milenios atrás por su abundancia y facilidad de cortado en la construcción de viviendas; también por las condiciones de frescura que proporciona en climas cálidos-húmedos.

A nivel nacional se puede identificar varias empresas que realizan proyectos exclusivamente con esta especie de bambú; cada una, desde una perspectiva distinta, donde el enfoque puede ser comercial tanto en su utilización para la construcción como también en la

fabricación de productos compuestos, o simplemente como elaboración de elementos decorativos. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las empresas que utilizan *Dendrocalamus asper* en el Ecuador, con diferentes fines comerciales.

**Tabla 1**

*Empresas que trabajan con Dendrocalamus asper a nivel nacional.*

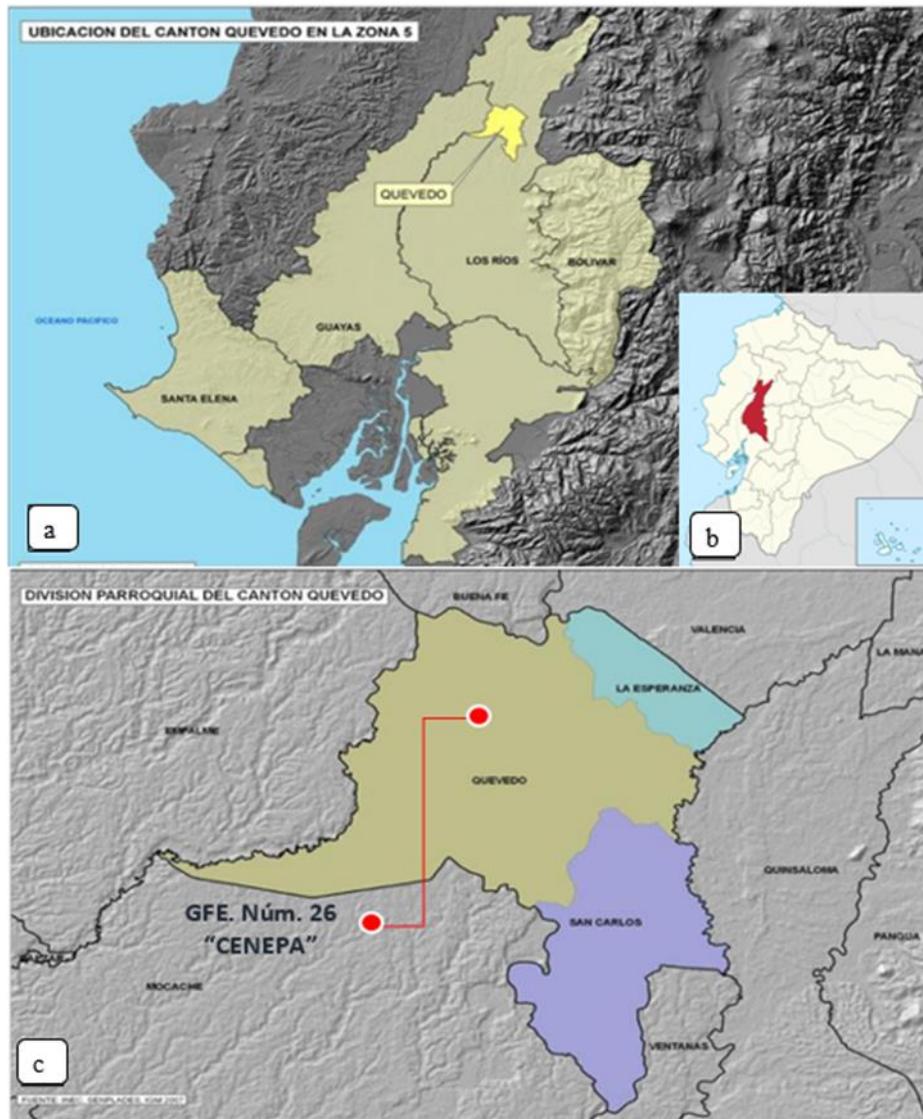
<b>Empresa</b>	<b>Provincia</b>	<b>Localidad</b>
ALLPABAMBÚ	Pichincha	Quito
APROGUADUA	Guayas	El Empalme
ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES AGROPECUARIOS DELICIAS NATURALES	Loja	Puyango/El arenal
ASOCIACIÓN AGROPECUARIA RIO SIETE	El Oro	Machala
BAMBÚ DE LA TIERRA	Pichincha	Quito
BIGBAMBOO	Pichincha	Pedro Vicente Maldonado
CENTRAL DEL BAMBÚ ANDOAS (CENBA)	Pichincha	Pedro Vicente Maldonado
IDEAS EN MADERA & BAMBÚ IMABU CIA. LTDA	Pichincha	Quito
INDUBAMBU/MADEL	Pichincha	Quito
PROYECTO BAMBÚ (GADP SANTA ELENA)	Santa Elena	Manglaralto
RAIN FOREST BAMBOO	Pichincha	Quito
REINO STUDIOS (TRIPLEDESIGN STUDIO CIA. LTDA.)	Pichincha	Quito

Editado del "Directorio de contactos del sector bambú en Ecuador" (2017)

#### **1.4. Descripción del proyecto**

El proyecto en un contexto general, consiste en la determinación de las propiedades físico-mecánicas del *Dendrocalamus asper* y su funcionalidad estructural en un marco de aplicabilidad para la industria de la construcción. Consecuentemente se analizarán los resultados generados en laboratorio para diseñar dos prototipos habitacionales sismorresistentes y económicamente viables orientados a (i) suplir las necesidades del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA” quienes afrontan un déficit habitacional en vivienda fiscal para sus miembros militares, y (ii) satisfacer la necesidad planteada por la empresa 3A Composites de construir uno de los prototipos de vivienda, con el fin de fomentar en la cultura ecuatoriana la importancia de elaborar viviendas no-convencionales en base a biomateriales (término empleado para todo el documento cuando desee referirse a material natural).

La localización de las instituciones anteriormente citadas y beneficiarias del presente estudio, se encuentran en la provincia de Los Ríos, cantón Quevedo. El marco regional en el que se desenvuelve la investigación se puede visualizar en la Figura 1.

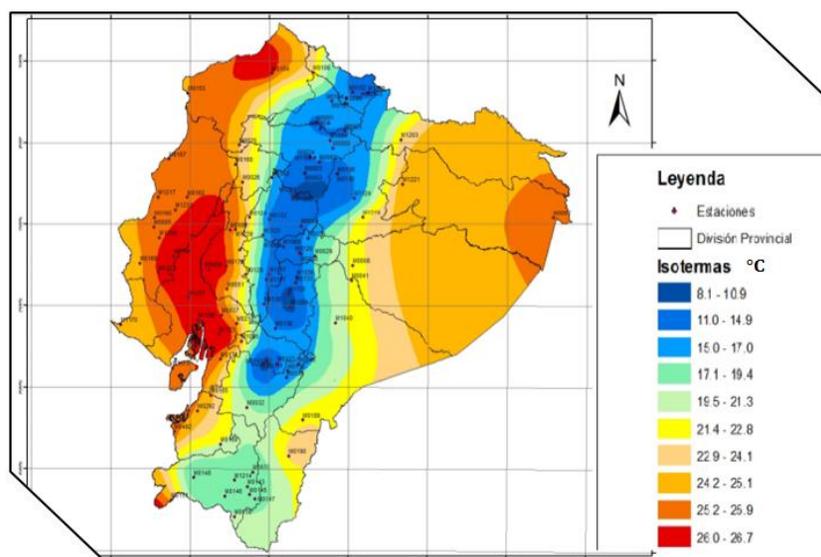


**Figura 1.** Marco regional para el desarrollo del proyecto de investigación  
 (a) Ubicación del cantón Quevedo, (b) Ubicación de la provincia de Los Ríos  
 en el Ecuador, y (c) Ubicación de la parroquia y el lugar de análisis.

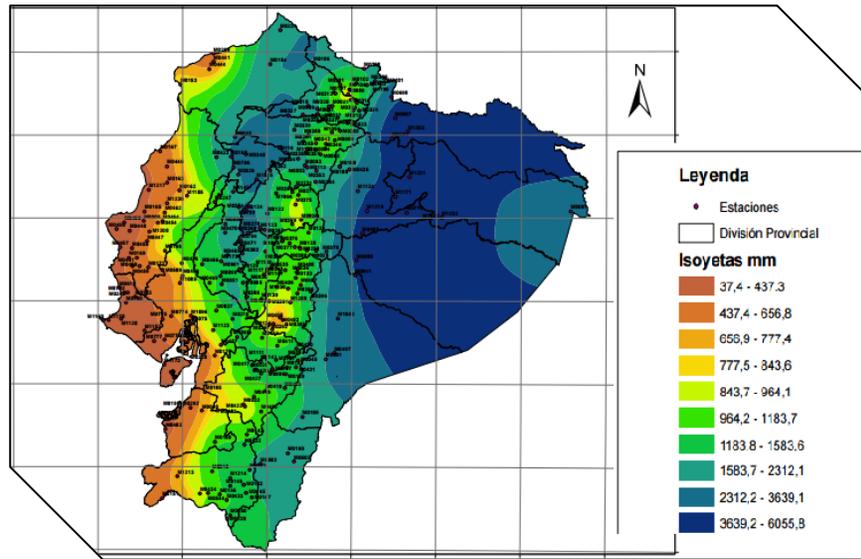
Fuente: SENPLADES (2014)

El *Dendrocalamus asper* será extraído de las plantaciones del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, dónde los rodales (familia de bambúes) bordean aproximadamente las 5 hectáreas y se encuentran en un ambiente que posee una temperatura promedio de 25,5 °C, como

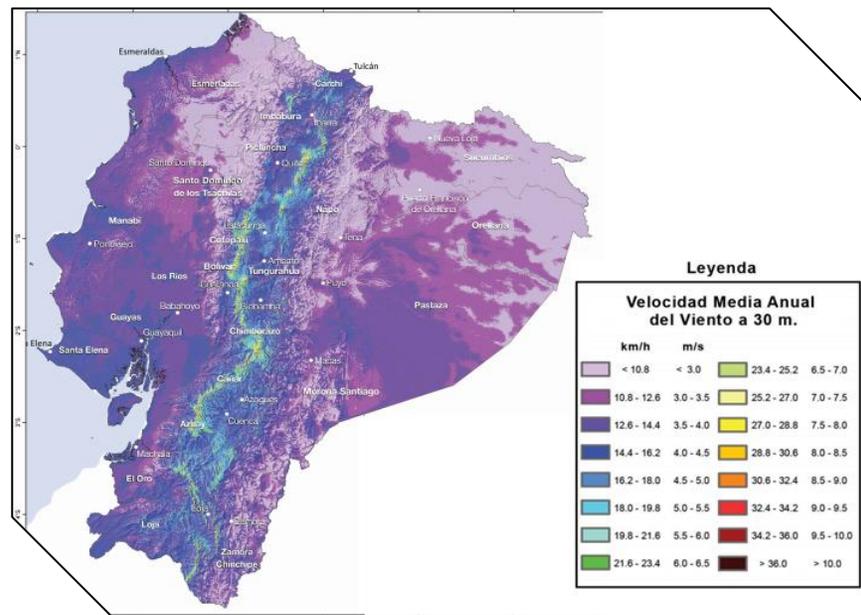
se puede evidenciar en la Figura 2. Adicionalmente, INAMHI (2016) ha establecido que la precipitación anual promedio en este sector (de acuerdo a las líneas isoyetas mostradas en la Figura 3) es de 2150 mm; clasificando a esta localidad como una zona subtropical lluviosa cuyo invierno arranca desde el mes de diciembre para finalizar en el mes de abril. Otro dato relevante en este sector son las velocidades de viento las cuales, según El MEER (2014) están en los 14 km/h medidos a 30 m sobre el suelo, valor que se detalla en la Figura 4.



**Figura 2.** Líneas isotérmicas del Ecuador.  
Fuente: INAMHI (2016)



**Figura 3.** Isoyetas o isolíneas del Ecuador.  
Fuente: INAMHI (2016)



**Figura 4.** Velocidades del viento (30 m sobre el suelo) Ecuador.  
Fuente: MEER (2014)

Con la información previa y de acuerdo a las características de la especie se procederá a realizar el correspondiente tratamiento de las muestras para su intervención en laboratorio, en el que se efectuarán los ensayos de carácter físico, como son: contenido de humedad y densidad básica, para luego analizar sus propiedades mecánicas presentes en los resultados obtenidos durante los ensayos de: compresión, flexión, tracción y corte; consiguiendo así, sus respectivos módulos de elasticidad y resistencia.

A continuación, se elaborarán dos propuestas habitacionales adaptadas a diferentes requerimientos socio-económicos que se especificarán en el Capítulo 6 de esta investigación, analizando sus disposiciones e implementando el Análisis de Elementos Finitos conocido como (FEA por sus siglas en inglés), con estos resultados se procederá a desarrollar el modelamiento del biomaterial en estudio mediante el programa LSDYNA para evaluar su comportamiento en términos mecánico-estructurales.

Culminada la investigación, se presentará un producto ingenieril que busca solventar el déficit habitacional de los miembros militares del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, proponiendo un modelo económico con diseño y cálculo estructural previo, realizado por técnicos en la construcción dotados de conocimientos en biomateriales y viviendas sustentables de bajo costo e impacto ambiental positivo.

Paralelamente, el proyecto busca crear un manual de construcción con bambú, específicamente con la especie *Dendrocalamus asper*, el cual se socialice a nivel profesional y enfatice la importancia que requiere una vivienda no convencional de este tipo, con sus respectivas

bases teóricas y técnicas que argumenten su sostenibilidad y garanticen las seguridades que requiere la ciudadanía en general.

Con el plan piloto llevado a cabo en Quevedo, dentro de las instalaciones del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, el Gobierno Nacional podrá visualizar y ejemplarizar el modelo habitacional propuesto, con el fin de industrializar la técnica aplicada para posteriormente dotar de viviendas a la población costera que enfrentan hasta el día de hoy, estragos a causa del terremoto ocurrido.

### **1.5. Justificación e importancia**

En el contexto global, una de las principales causas de contaminación ambiental es la explotación de materiales pétreos, de los que está compuesto el hormigón (material convencional de construcción), el mismo que al ser reforzado con acero estructural libera un gran porcentaje de CO<sub>2</sub> por lo que se convierte en un producto altamente contaminante. Bajo esta premisa, radica la gran importancia en la utilización de materiales alternativos dentro de los parámetros estructurales que requiere la industria de la construcción.

Desde otro enfoque, cabe mencionar que el terremoto ocurrido en abril del 2016, permitió al Ecuador visualizar las falencias existentes en torno a la construcción, y comprobar como el inadecuado uso de materiales sin una guía apropiada, provocan el colapso estructural ante eventos sísmicos.

El presente proyecto permite conocer la innovación técnica y bondades de construir con materiales no convencionales como el bambú, en su especie *Dendrocalamus asper*, debido a su

exuberante presencia en la Costa Ecuatoriana y también por ser catalogado como un material de beneficios naturales excepcionales ante requerimientos de seguridad en su uso estructural. Además, su capacidad de crecimiento, producción y reforestación, son características razonables que permiten explotar el material sin repercusión negativa hacia el ecosistema.

En cuanto a la factibilidad de esta investigación, se analizarán tres factores que fundamentarán el uso del *Dendrocalamus asper* como material alternativo en la construcción. El primer factor es el técnico-arquitectónico, en el cual se detallará las ventajas mecánicas-estructurales del espécimen de bambú, las cuales pueden ser aprovechadas de manera integral con los correctos controles y sus apropiados estándares.

El segundo factor recae en el marco ambiental, para el cual se examina el consumo energético que se requiere durante el procesamiento y las actividades asociadas para la explotación del bambú. Según Rodríguez et al. (2006), han determinado que para el procesamiento del bambú se requiere 30 MJ/m<sup>3</sup> por N/mm<sup>2</sup>, mientras que para la madera se utiliza 80,240 MJ/m<sup>3</sup> por N/mm<sup>2</sup> y 1500 MJ/m<sup>3</sup> por N/mm<sup>2</sup> para hormigón y acero (la unidad presentada anteriormente describe la tasa de energía utilizada para la producción de materiales en la construcción). Con estas cifras, se destacan las propiedades ecológicas y la mínima intervención ambiental que se realiza al utilizar la caña de bambú.

Por último, pero no menos importante, otro factor clave para catapultar al proyecto de investigación es el análisis socio-económico que representa trabajar con la caña de bambú; en el cual se puede destacar que, el uso de este biomaterial puede llegar a ser una fuente de sustento económico si se desarrolla un manejo de explotación organizado; además, al ser un material de

fácil acceso no se precisa de herramientas o equipos sofisticados; factor importante a tomar en cuenta para el campo constructivo in situ. Asimismo, cabe recalcar su bajo costo, por el cual está al alcance de todos los sectores del país.

A través de los factores expuestos y su respectivo análisis, se pretende ofrecer una solución coherente que satisfaga (i) las necesidades del personal militar del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, quienes enfrentan un déficit habitacional, pero a su vez cuentan con extensas plantaciones especímenes madereros como: teca, guayacán y bambú; y, (ii) los requerimientos técnico-estructurales y ecológicos que motiva el interés de inversión por parte de la empresa 3A Composites, quienes cuentan con la base industrial y económica para la construcción piloto de uno de los prototipos.

La construcción con estos materiales no convencionales en el país no ha sido aún explotada, debido a la deficiente información y a su casi nulo conocimiento mecánico-estructural que en realidad llega a aportar de sobremanera a un sistema constructivo técnicamente elaborado. Al mismo tiempo se intenta incentivar las buenas prácticas ambientales a fin de proyectarse como una visión diferente de solución eficaz y eficiente.

El proyecto en curso pretenderá abastecer cronológicamente los parámetros de diseño y modelamiento de la estructura, para que la propuesta habitacional sea segura y cumpla con las normas de diseño convencionales en la construcción, pero en este caso el valor agregado que motiva la investigación es cambiar la mentalidad ingenieril en función de la sostenibilidad y vulnerabilidad sísmica presentes en las obras civiles del Ecuador.

## 1.6. Proyectos relacionados

Para lograr un alcance sólido en la investigación ha sido necesario indagar proyectos científicos de acceso público relacionados con el tema del presente documento. Por tanto, en la Tabla 2 se presenta las diferentes investigaciones relacionadas con el *Dendrocalamus asper* como material de construcción.

**Tabla 2**

*Investigaciones relacionadas al Dendrocalamus asper como elemento constructivo*

Número	Tema	Autor	Publicación	Año
1	Mechanical properties of bamboo	Latit, D.K	University Malaysia Sarawak	2010
2	Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties	Kazuya Okubo, Toru Fujii, Yuzo Yamamoto	Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issue 3, March 2004, Pages 377-383	2004
3	Fracture properties of bamboo	Shigeyasu Amada, Sun Untao	Engineering, Volume 32, Issue 5, 2001, Pages 451-459	2001
4	Mechanical properties of bamboo, a natural composite	Lakkad S.C., Patel J.M.	Fibre Science and Technology, Volume 14, Issue 4, June 1981, Pages 319-322	1981

**Tabla 2**

*Investigaciones relacionadas al Dendrocalamus asper como elemento constructivo (continuación)*

<b>Número</b>	<b>Tema</b>	<b>Autor</b>	<b>Publicación</b>	<b>Año</b>
5	Determinación de las propiedades mecánicas de la caña Guadua Angustifolia del Ecuador cuando está sometida a fuerzas axiales	Antonio La Tegola, Luis Octavio Yépez Roca, Walter Vicente Mera Ortíz, Pedro Córdova Alcívar	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	2016
6	Diseño de un modelo de vivienda ecológica con bambú para la zona rural de Yantzaza.	Figuroa Saavedra, Hilter Farley; Calva Chuquimarca, Luis Fernando	Universidad Nacional de Loja	2015
7	Determinación de las propiedades mecánicas de la caña Guadua Angustifolia del Ecuador sometida a esfuerzos flectores y cortantes	Antonio La Tegola, Luis Octavio Yépez Roca, Walter Vicente Mera Ortíz, Pedro Luis Córdova Alcívar	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	2015
8	Determinación de resistencia de uniones estructurales en Bambú (Guadua Angustifolia), Bosque: Flor del valle, distrito/provincia: Rioja, departamento: San Martín.	Huarcaya Lizana, Jesús David	Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú	2010
9	Determinación de las características geométricas de la caña guadua angustifolia del Ecuador	Antonio La Tegola, Luis Octavio Yépez Roca, Walter Vicente Mera Ortíz, Pedro Luis Córdova Alcívar	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	2015

**Tabla 2**

*Investigaciones relacionadas al Dendrocalamus asper como elemento constructivo (continuación)*

<b>Número</b>	<b>Tema</b>	<b>Autor</b>	<b>Publicación</b>	<b>Año</b>
10	Propiedades físicas mecánicas de la guadua angustifolia kunth y aplicación al diseño de baterías sanitarias del IASA II	Arias Santillán, Mario	Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE	2007
11	Estudio de las propiedades físicas de la caña guadua y su aplicación como refuerzo en la construcción de estructuras de adobe	Bonilla Sánchez, David Jahel; Merino Cabezas, José Gabriel	Escuela Politécnica Nacional	2017
12	Proceso de industrialización de la caña Guadua como material alternativo para la construcción y diseño de vivienda tipo de una y dos plantas, empleando caña Guadua en sus elementos estructurales	Tandazo Regalado, Jorge Enrique; Flores Díaz, Gustavo David	Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE	2012
13	Estudio de conexiones entre elementos estructurales de caña Guadua sometidos a carga axial	Nolivos Valiente, Juan Carlos; Yacelga Díaz, Jaime Gonzalo	Escuela Politécnica Nacional	2010
14	Caracterización anatómica de las especies <i>Bambusa vulgaris</i> y <i>Dendrocalamus asper</i> provenientes de Oxapampa (Perú)	Claudia Silvana Damiani Fontana	Universidad Nacional Agraria "La Molina" Facultad de Ciencias Forestales	2013

**Tabla 2**

*Investigaciones relacionadas al Dendrocalamus asper como elemento constructivo (continuación)*

<b>Número</b>	<b>Tema</b>	<b>Autor</b>	<b>Publicación</b>	<b>Año</b>
15	Aplicaciones Estructurales de la Guadua ( <i>Guadua Angustifolia Kunth</i> ). Proyecto de Estructura Modular Multifuncional en Colombia	Elvira de Navas Gutiérrez	Universidad Politécnica de Madrid	2016
16	La huella hídrica del bambú gigante ( <i>Dendrocalamus asper</i> ) como indicador de sustentabilidad en la construcción	Chuquimarca Carrión, José Antonio	Universidad San Francisco de Quito	2016
17	Properties of oriented strand board made from Betung bamboo ( <i>Dendrocalamus asper</i> (Schultes.f) Backer ex Heyne)	Fauzi Febrianto Sahroni Wahyu Hidayat Edi Suhaimi Bakar Gu-Joong Kwon Jin-Heon Kwon Soon-Il Hong	Kangwon National University, Korea.	2010

### 1.7. Objetivo General

Caracterizar física y mecánicamente al *Dendrocalamus asper* mediante ensayos de laboratorio normalizados internacionalmente, para proponer dos diseños estructurales de viviendas sismorresistentes no-convencionales, uno destinado como solución al déficit habitacional para el Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA” y el otro como prototipo constructivo para la empresa internacional 3A Composites.

## 1.8. Objetivos Específicos

Realizar una revisión bibliográfica del *Dendrocalamus asper* en repositorios académicos investigando así, su hábitat, morfología y el tratamiento necesario para realizar sus correspondientes ensayos técnicos avalados por las normativas internacionales en construcciones con bambú.

Elegir los métodos y ensayos técnicos estipulados en la normativa ISO-22157 para el uso estructural del bambú, así como también los direccionamientos y consideraciones de la NEC GaK (Estructuras de Guadua) en la construcción, cuya metodología será utilizada en el laboratorio para los respectivos cálculos analíticos que definan las propiedades físico-mecánicas del *Dendrocalamus asper*.

Seleccionar muestras de *Dendrocalamus asper* extraídas de la plantación perteneciente al Grupo Militar acantonado en Quevedo, basándose en la correcta forma de corte y cuidado forestal que requiere una planta de este tipo, detallando condiciones ambientales, transporte, edad y parámetros físicos que permitan evaluar un informe técnico del biomaterial en estudio.

Procesar la información adquirida durante los ensayos de laboratorio del biomaterial, evidenciando a través de informes técnicos obtenidos mediante módulos estadísticos computacionales o preestablecidos directamente en los equipos de análisis, para su posterior comparación con estudios similares y proyectos estandarizados.

Realizar el diseño arquitectónico y cálculo estructural utilizando bases técnicas normadas para dos tipos de viviendas no-convencionales construidas con *Dendrocalamus asper* como

material alternativo sustentable, sismorresistente y amigable con el medio ambiente que supla el déficit habitacional del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA” y simultáneamente, se construya un modelo real con las características requeridas por la empresa 3A Composites.

Analizar el comportamiento mecánico de los elementos estructurales de *Dendrocalamus asper* y su rendimiento sísmico a través del modelamiento estructural en FEA utilizando el software LSDYNA para determinar su eficiencia en su funcionamiento biomecánico-estructural y proveer medidas de prevención ante deficiencias proyectadas en el tiempo de vida útil del biomaterial.

Elaborar un análisis económico y presupuestario del prototipo habitacional no convencional destinado al Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, que integre el interés social dentro de los parámetros que exige la construcción para la futura inversión estatal.

Elaborar un análisis económico y presupuestario del prototipo habitacional no convencional destinado a la empresa 3A Composites, enfocando un modelo sofisticado de atractiva apreciación visual y que integre planificar su futura construcción consolidando nuevas metas institucionales.

Proponer esta investigación como un manual técnico que estandarice procesos de explotación, preservación, construcción y reforestación de la especie *Dendrocalamus asper* como material de construcción alternativo para viviendas localizadas en zonas de alto riesgo sísmico.

## **1.9. Hipótesis**

El *Dendrocalamus asper* presenta propiedades físico-mecánicas óptimas y de mínimo impacto ambiental que lo hacen competente para la construcción habitacional debido a su comportamiento estructural de excelencia ante cargas estáticas, dinámicas y sísmicas.

### **1.10. Variables de investigación**

*Variable dependiente:* Comportamiento mecánico estructural sismorresistente de los elementos evaluados en una vivienda de dos pisos.

*Variable independiente:* Espécimen del *Dendrocalamus asper* Ecuatoriano, sembrado en las plantaciones del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, acantonado en Quevedo - Ecuador.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Introducción y definiciones

En la era de la industrialización la selección de materiales constructivos adecuados es prioritaria, determinada principalmente por el precio y la facilidad de producción o procesamiento. Por esta razón, los materiales industrializados como el cemento portland ordinario (CPO) y el acero, se han posicionado como materiales primordiales e integrales en el desarrollo económico y social de una nación; sin embargo, sus repercusiones medioambientales se han ido ignorando al pasar de los años, subestimando la problemática que genera el uso de los mismos.

En la última mitad del siglo XX, gracias a la tecnología del momento, se han desarrollado materiales avanzados, constituidos de polímeros sintéticos como rayón, nylon, poliéster, kevlar, nuevas aleaciones de metales y fibras de carbono, entre otros; estas innovaciones son introducidas en lugares donde su consumo y valoración es abundante, especialmente en los países en desarrollo. En contraste, en los países subdesarrollados, el sistema educativo obsoleto basado en el marco de programas arcaicos de las naciones industrializadas, no permite generar un programa formal de educación o investigación sobre nuevos materiales y tecnologías tradicionales. Desde esta perspectiva, los proyectos de aprovechamiento sostenible como la inclusión de la caña de bambú a modo de sustituto de los materiales constructivos convencionales, se vuelve extremadamente factible.

Partiendo del análisis expuesto, con la presente investigación se busca analizar al bambú como recurso natural; el cual, a lo largo de todo su ciclo productivo, brinda grandes beneficios

medioambientales, como el mejoramiento en la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> en los bosques, la contribución en la regeneración de los suelos; y, el aporte para prevenir la deforestación a través de su corto período de crecimiento; esta última característica permite generar una fuente de producción industrial de alto valor, debido a que, la planta al alcanzar una edad adecuada conserva notables niveles de resistencia y flexibilidad, siendo estos parámetros fundamentales en el ámbito del desarrollo constructivo (Jaquit, 2000).

Por otra parte, Janssen (1981) ha analizado la energía necesaria para producir 1 m<sup>3</sup> por unidad de esfuerzo en los materiales comúnmente utilizados en la construcción civil y se ha comparado con la requerida por el bambú, encontrándose que, para el acero es necesario consumir 50 veces más energía que la que requiere este biomaterial (término utilizado a través de todo el documento cuando desee referirse a material natural). De igual manera se sabe que, el árbol de bambú es un enorme retenedor de carbono y productor de oxígeno en relación 2:1 (medidos en toneladas), lo que no sucede con la relación producción-emanación del acero, que en muchos casos llega a alcanzar la proporción de 1:3 (medido también en toneladas) dependiendo de los procesos de fabricación. Otro punto a favor de este biomaterial le corresponde a la resistencia de tracción, que de manera general entre especies, ha llegado a alcanzar los 25 GPa (Dunkelberg, 1985), característica mecánica que si se relacionara con su densidad y ésta es comparada con las mismas propiedades en el acero, la proporción resultantes es de 10:1 a favor del bambú, convirtiéndolo evidentemente como un considerable competidor constructivo (Ashby y Cebon, 1993).

La actual investigación tiene como parte de sus objetivos fundamentales realizar y comparar la caracterización físico-mecánica de la especie de bambú *Dendrocalamus asper* (se denominará

*D. asper* en adelante), cuyas plantaciones se encuentran dentro de las instalaciones del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA” (denominado GFE-N°26 en adelante). Los resultados esperados buscan dar respuesta al comportamiento estructural de este material frente a los esfuerzos de compresión, corte, tracción y flexión, determinando así la posibilidad de su uso en proyectos arquitectónicos que apliquen criterios de construcción sostenible.

### Glosario y definiciones

**Anhídrido:** Prefijo “*an-*”, es equivalente a “sin” y el sustantivo “*hydros*”, es sinónimo de “agua” (RAE, 2014).

**Bambú o Planta de bambú:** Planta herbácea con tallos leñosos, perteneciente a la familia de las Poaceae (gramíneas), sub familia Bambúesoideae, tribu Bambúeseae (E.100-Bambú, 2012).

**Caña de bambú:** Tronco visible segmentado que emerge del suelo, el cual es hueco y nudoso (E.100-Bambú, 2012):

**Chusquín:** El término “chusquín” nació con el parecido morfológico existente entre los primeros estados de desarrollo de una plántula de chusque con un brote basal del rizoma del bambú (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

**Cizallamiento:** Deformación lateral que se genera por la acción de una fuerza externa, también se lo conoce como corte o cortadura (Bonilla Jiménez et al., 2017).

**Culmo:** Tallo del bambú, el cual presenta nudos y entrenudos que nacen del rizoma, se lo puede denotar como referencia equivalente al tallo de un árbol (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

a) Nudo: Parte o estructura del tallo que lo divide en secciones por medio de diafragmas.

- b) Entrenudo: Parte de la caña comprendida entre dos nudos.
- c) Diafragma: Membrana rígida que forma parte del nudo y divide el interior de la caña en secciones.
- d) Pared: Parte externa del tallo formada por tejido leñoso.

**Dimorfismo:** La ocurrencia de dos formas distintas de las mismas partes en una planta, como en las hojas juveniles y adultas de la hiedra. (Puigdomènech, 1986).

**Díptera:** Orden de insectos que tienen un aparato bucal dispuesto para succionar con dos alas membranosas (Puigdomènech, 1986).

**Esclerénquima:** Es el tejido de soporte característico de ciertas especies de plantas cuyas células maduras están generalmente muertas y tienen paredes secundarias muy engrosadas que contienen lignina. Las células son rígidas y no se pueden estirar; y, generalmente se encuentran en regiones no pobladas de los cuerpos de las plantas, como la corteza o los tallos maduros. Las células del esclerénquima se presentan en muchas formas y tamaños diferentes, existen dos tipos principales: fibras y esclereidos (Liese, 1992).

**Floema:** Tejido que conduce los azúcares de las hojas al resto de la planta (Liese, 1992).

**Higroscópico:** Dícese de la capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medio circundante (RAE, 2014).

**Hymenóptera:** Se conoce así, al grupo de insectos que poseen alas membranosas con un aparato bucal dispuesto en forma de mandíbulas o taladro. Comprende a las abejas, abejorros, avispa y hormigas, entre otros (Puigdomènech, 1986).

**In situ:** Locución latina que significa en el lugar, en el sitio (RAE, 2014).

**Lanceolada:** Refiere a la forma que asimila una punta de lanza que caracteriza a la hoja, pétalo u otro órgano laminar de una planta (Bonilla Jiménez et al., 2017).

**Lignificación:** Proceso requerido en algunas plantas para adquirir leñosidad a través del depósito de lignina (polímeros fenólicos) en sus cavidades vasculares (Puigdomènech, 1986).

**Metaxilema:** Parte primaria del xilema caracterizado por ser el último en desarrollarse y estructurado por superficies parecidas a una red y elementos traqueales más amplios (Liese, 1992).

**Paquimorfo:** Conocido también con el término simpodial, es el tipo de rizoma que se caracteriza por ser corto, grueso, con internudos asimétricos con mayor anchura que longitud, y sólido en sus raíces (Coto, 1991).

**Parcela:** Proviene del francés *parcelle* como también del latín *particella*, término que hace referencia para nombrar una porción pequeña de terreno perteneciente a una más grande (RAE, 2014).

**Parénquima:** Tejido típicamente compuesto de células vivas que tienen paredes delgadas intercaladas y es adaptable para diversas funciones de la planta. Las células se encuentran en muchos lugares a través del cuerpo de las plantas y, dado que están vivas, participan activamente en la fotosíntesis, la secreción, el almacenamiento de alimentos y otras actividades de la vida vegetal. El parénquima es uno de los tres tipos principales de los tejidos fundamentales en las plantas, junto con el esclerénquima que son tejidos de soporte muerto con paredes gruesas y la colénquima que son tejidos de soporte vivos con paredes irregulares (Liese, 1992).

**Pecíolo:** Es el enlace entre las hojas y el tallo verdadero, se lo conoce también como tallo de la hoja (Puigdomènech, 1986).

**Plántula:** Embrión que se ha desarrollado como producto de la germinación (Puigdomènech, 1986).

**Protoxilema:** El primer tejido de xilema en desarrollarse y caracterizado por los elementos conductores estrechos con espesamientos anulares, espirales o reticulares (Liese, 1992).

**Rolliza:** Estado natural en el que se encuentran generalmente los tallos de bambú (E.100-Bambú, 2012).

**Silvicultura:** Es la teoría y la práctica de controlar el establecimiento, la composición, la constitución y el crecimiento de los bosques. El enfoque de la silvicultura es la regeneración (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

**Sub-fusiforme:** Disposición elipsoidal muy elongada; característica de ciertos tipos de tubérculos (Carmioli Umaña, 2009).

**Teselación:** Recubrimiento de una superficie en forma de mosaico con figuras poligonales no superpuestas (De Castro et al.).

**Vana:** *adj.* Sin efecto, es inútil. *Botánica.* Está vacío por dentro, podrido o seco (RAE, 2014).

**Xilema:** Tejido vascular de la planta que transporta el agua y los minerales disueltos de las raíces al resto de la planta y también proporciona la ayuda física. El tejido de xilema consiste en una variedad de células especializadas, conocidas como células conductoras de agua o elementos traqueales (Liese, 1992).

**Xilófagos:** Término usado principalmente para describir a un consumidor primario (siendo estos bacterias, hongos o insectos) cuya dieta consiste principalmente en el procesamiento digestivo de la celulosa (Puigdomènech, 1986).

**Yema:** Es una protuberancia pequeña, inactiva en un rizoma, está presente en la región del nudo, es única y generalmente de forma triangular, alternando de un nudo a otro en posición dística (Sánchez Martínez, 2017).

### **Simbología y acrónimos**

Se presentan a continuación las siglas utilizadas durante toda la investigación para referirse de forma abreviada en tablas, gráficas o descripciones pertinentes al tema de estudio.

**B:** Sección inferior del culmo de bambú

**M:** Sección media del culmo de bambú

**T:** Sección superior del culmo de bambú

**IN:** Probeta de la sección del culmo entrenudos

**N:** Probeta de la sección del culmo con nudo

**L:** Dirección longitudinal

**T:** Dirección tangencial

**R:** Dirección radial

**M.C.:** Contenido de humedad

**MOE:** Módulo de elasticidad o módulo de Young

**MOR:** Módulo de ruptura o esfuerzo máximo

**G:** Módulo de rigidez

**$\nu$ :** Módulo de Poisson

**$\tau_{\max}$ :** Esfuerzo máximo de corte

**$\sigma$ :** Esfuerzo

**$\sigma_{\text{comp}}$ :** Esfuerzo de aplastamiento

**$\sigma_{\text{cr}}$ :** Esfuerzo crítico de pandeo

**$\delta_b$ :** Densidad básica

**KL:** longitud efectiva

**P:** Fuerza crítica aplicada

**$\pi^2 EI / (KL)^2$ :** carga de pandeo teórica de Euler

**r:** Radio de giro

**%:** Porcentaje

**R<sup>2</sup>:** Coeficiente de determinación

**CoV:** Coeficiente de variación

⊥ : Análisis paralelo a la fibra

⊥ : Análisis perpendicular a la fibra

### Sistema de unidades

Se utilizarán las unidades del Sistema Internacional (S.I.) en referente con la Norma NTE INEN-ISO 80000-1:2014 CANTIDADES Y UNIDADES – PARTE 1: GENERALIDADES (ISO 80000-1:2009, IDT):

- Altura y Distancia: m (metro), cm (centímetro), mm (milímetro)
- Diámetro: mm (milímetro)
- Área: m<sup>2</sup> (metro cuadrado), mm<sup>2</sup> (milímetro cuadrado), Ha (hectárea)
- Temperatura: °C (grados centígrados)
- Momento de inercia: mm<sup>4</sup> (milímetro a la cuarta)
- Fuerza y Carga: N (newton), kgf (kilogramo fuerza), Tn (Tonelada)
- Masa: kg (kilogramo), g (gramo), Mg (megagramos)
- Resistencia a esfuerzos o progresión de esfuerzos: MPa (megapascal) o N/mm<sup>2</sup> (newton por milímetro cuadrado), Pa (pascal) o N/m<sup>2</sup> (newton por metro cuadrado), GPa (gigapascal).
- Velocidad: m/s (metro por segundo), mm/min (milímetro por minuto)
- Potencia eléctrica: V (voltios)
- Tiempo: min (minutos), s (segundos)

## **2.2. La construcción y el impacto ambiental en el mundo**

A lo largo del tiempo el uso intensivo del suelo, la explosión demográfica y el desarrollo económico han provocado que el medio ambiente se vea afectado; hoy en día la sociedad ha comenzado a percibir el riesgo que genera agotar los recursos naturales y su efecto contraproducente en el ecosistema.

Todos los materiales de construcción inciden en el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción y procesamiento de materias primas hasta su desecho como residuo (Cabello, 2008). En términos estadísticos, se puede afirmar que el sector de la construcción emplea el 50% de los recursos naturales, consume el 40% de la energía no renovable (incluyendo la energía en uso) y genera el 50% de residuos (Anink et al., 1996). Esta incidencia energética y medioambiental por la que atraviesan los recursos para la construcción civil durante todo su ciclo de vida, determina el modelo irracional por el cual las sociedades se han desarrollado. Cada una de las fases involucradas en el procesamiento de materiales y sus períodos de repetición acelerados, alimentan las estadísticas que han hecho estragos en el ecosistema. La fase inicial está dada por la extracción de materias primas, constituyéndose la etapa más impactante, dado que la extracción de rocas, minerales industriales y recursos madereros se realizan (en repetidas ocasiones) sin las medidas de recuperación adecuadas. De aquí, se deriva la siguiente fase perteneciente a los procesos de fabricación y sus consecuencias ambientales, los cuales proceden (i) de la gran cantidad de materiales convencionales que se emplean, y (ii) del gran consumo energético requerido para alcanzar el producto final. El efecto de estos procesos se traducen en emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, polvos en suspensión, ruidos, vibraciones, derrames de líquidos contaminantes, residuos y exceso de consumo energético (Cabello, 2008).

Consecutivamente la fase de empleo de estos materiales procesados dependerá de la utilidad que el material brinde a la industria de la construcción (como se mencionó en la introducción de esta sección). Por último, la fase final de su ciclo de vida recae en el tratamiento que se le da al material como residuo, que en su mayoría proceden de derrocamientos de edificios, rechazos de construcción y reformas a proyectos en ejecución.

Cada una de estas etapas y sus posteriores consecuencias modifican y degradan el suelo paulatinamente, sin mencionar las enormes cantidades de polución generadas (Cabello, 2008). Toda la problemática antes mencionada, hace necesario la inclusión de nuevos materiales sustentables alternativos, que brinden soluciones óptimas para la industria constructiva.

### **2.2.1. Construcción con materiales no convencionales**

El término construcción sostenible no sólo abarca las edificaciones persé, sino también la manera en la que éstas se integran al entorno para formar las ciudades. El desarrollo urbano sostenible busca crear un entorno en el que no se atente al medio ambiente y que proporcione recursos urbanísticos autosuficientes, tanto en los diseños como en la eficiencia energética, sin dejar de lado su funcionalidad, habitabilidad y seguridad sismorresistente, generando calidad a mediano y largo plazo (Ramírez, 2009).

La implementación de nuevos sistemas constructivos es lo que justamente busca la construcción con materiales no convencionales, al fusionar el entorno del medio ambiente con el desarrollo urbano-sostenible, proponiendo la diversificación de la materia prima alternativa como insumo fundamental de las obras civiles.

La utilización de la madera como material natural de construcción es una alternativa viable que ha dado excelentes resultados de resistencia mecánica a lo largo del tiempo, sin embargo, es evidente que la cantidad de este recurso ha ido disminuyendo paulatinamente con el pasar de los años, generando un incremento en el precio de la madera, lo que provoca la disminución de la demanda en comparación con otros materiales no convencionales. Por este motivo, la caña de bambú a pesar de ser una especie semejante a las maderables, difiere en muchos aspectos, como en su morfología, en su período de crecimiento e incluso en sus propiedades mecánicas; razones que convierten a este biomaterial en una alternativa óptima para las exigencias estructurales de hoy en día.

La importancia de proponer un modelo de vivienda sostenible radica en satisfacer las expectativas que requieren los habitantes y también se pretende causar el mínimo impacto ambiental durante las construcciones, llevándolas a formar parte de la naturaleza. Para lograrlo, se debe comprender el comportamiento del entorno y realizar un estudio del paisaje, la hidrología, la vegetación, el clima y fuentes de energía, con el propósito de desarrollar un diseño consecuente con la naturaleza.

### **2.3. Impacto del terremoto del 2016 en la construcción ecuatoriana**

La privilegiada localización del Ecuador crea condiciones climáticas y geográficas beneficiosas, las cuales proveen climas diversos, cuantiosos recursos hídricos y vegetales, así como también fertilidad en los suelos que hacen de esta región un atractivo mundial. Sin embargo, no deja de ser un sector vulnerable de la corteza planetaria, evidenciado por su amplia actividad tectónica y volcánica; fenómenos relacionados íntimamente con la zona de subducción entre

placas. Desde el año 1900 se han registrado alrededor de siete terremotos (magnitud 7 o superior) que han provocado perjuicios considerables en diversas zonas del Ecuador (Carrión et al., 2017).

El 16 de abril del 2016, el Ecuador vivió uno de los desastres naturales más devastadores de su historia. Según el informe técnico del IGM y EPN (2016), el terremoto de magnitud de 7,8 (escala de Richter), tuvo lugar a las 18h58 (hora local) y cuyo hipocentro se ubicó frente a Pedernales (Manabí), a 20 km de profundidad. El movimiento fue resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la Placa de Nazca (llamada también Oceánica) que se sumerge bajo la Placa Sudamericana (conocida como Continental), fenómeno denominado como subducción y razón física que dio lugar al evento telúrico.

Comúnmente un terremoto se representa como puntos en los mapas, pero los terremotos de esta magnitud realmente se describen de manera más apropiada como deslizamiento sobre un área más grande de falla. Eventos de la magnitud del terremoto ocurrido el 16 de abril, generalmente se caracterizan por abarcar un área aproximada de 160 x 60 km (largo y ancho respectivamente) (SGR, 2016).

Aquellos pocos segundos de actividad telúrica evidenciaron la alta vulnerabilidad sísmica por la que atraviesa nuestro país y pusieron a prueba el protocolo emergente de las entidades de control encargadas, originando la pronta intervención del Comité de Operaciones de Emergencia (COE) y de la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) quienes en conjunto con las Fuerzas Armadas (FF.AA.) inmediatamente pusieron en ejecución planes de apoyo, logística e integración, articulando a ésta última entidad como ente moderador. El día del terremoto fueron desplegados 1435 efectivos en el área de influencia del desastre desde los repartos militares más cercanos; para

garantizar la seguridad de la población afectada, durante los días subsiguientes acudieron 13205 efectivos más, logrando contribuir positivamente con el control de las actividades de rescate e influir como apoyo en mesas de trabajo técnico y administrativo; cuya acción logró facilitar el acceso y distribución de agua, priorizando la salud, saneamiento, infraestructura y atención integral de la población en riesgo (Carrión et al., 2017).

Las alarmantes cifras de personas fallecidas y desaparecidas en conjunto con las infraestructuras públicas y privadas afectadas (mencionadas en la sección meso del planteamiento del problema) han ocasionado que al momento, los ingenieros y constructores del país fijen su punto de acción en las provincias y cantones en los que mayor daño se observaron (dado que allí, residen cerca del 10% del total de habitantes del país) con el fin de solventar los problemas de distribución territorial provocados por registros municipales con planos y licencias de construcción que en muchos casos no pasan por revisión profesional (SGR, 2016).

Simultáneamente, se ha planteado mejorar los sistemas constructivos utilizados actualmente, con el fin de minimizar la pérdida de vidas ante un movimiento sísmico de igual o mayor magnitud al ocurrido.

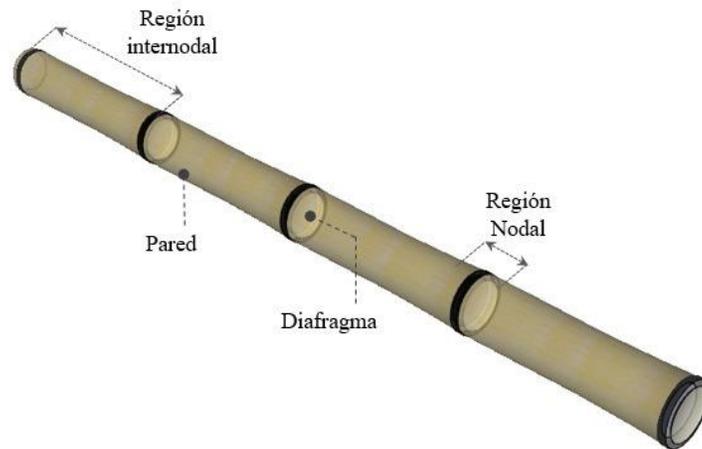
#### **2.4. Especies de bambú utilizadas como material de construcción**

Las especies más importantes de los bambúes utilizados en la construcción y usos generales en el hemisferio oriental son: *Arundinaria*, *Bambusa*, *Cephalostachyum*, *Dendrocalamus*, *Gigantochloa*, *Melocanna*, *Pyllostachys* y *Schizostachyum*. En el Ecuador, los bambúes están representados principalmente por los géneros Guadúa ("caña guadúa" o "caña brava") de las áreas tropicales, Chusquea ("suros", "suriillos" y "moyas") de la ceja andina de ambas cordilleras y

*Arthrostylidium* (la "tunda") de los descensos externos de la Cordillera Oriental; de estos bambúes, la caña guadúa ha llegado a posicionarse como el género más importante; sin embargo, la introducción de los géneros *Dendrocalamus* en vastas zonas del país, han llevado a estas dos especies a competir paralelamente por ser los más óptimos elementos alternativos de construcción, indudablemente gracias a sus importantes propiedades mecánico-estructurales (Costa-Solís, 1960).

El conjunto de bambúes, conocidos como rodales tiene un desarrollo importante, ya que entre sus funciones principales se destacan como reguladores de caudal hídrico, previniendo así la erosión del terreno y evitando posibles crecidas; además, se conoce que aportan gran cantidad de biomasa, por su excelente capacidad de almacenar CO<sub>2</sub> en sus estructuras, ocasionando un impacto positivo al ecosistema (Mognon, 2014).

La disposición de las fibras que componen las maderas da lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que, a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra; en este hecho reside la principal diferencia del comportamiento frente a otros materiales utilizados en estructuras como el acero y el hormigón. Las resistencias a compresión y tracción con sus respectivos módulos mecánicos en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular (Pilco Díaz, 2016). La Figura 5 presenta la estructura de un tallo de caña de bambú y las partes que lo componen.



**Figura 5.** Estructura de un culmo de bambú

Conscientes de la calidad estructural que poseen estas especies naturales, en los últimos años se han desarrollado estudios en diferentes regiones y lugares donde son cultivadas para determinar sus propiedades y comportamientos mecánicos eficientes que permitan adaptarlos dentro de los sistemas estructurales constructivos (La Tegola et al., 2015).

La caña de bambú es por sí misma un sistema portante de excelencia, es decir, en su mundo natural se puede observar un tallo alto y delgado (esbelto) que sorprende por su flexibilidad ante el viento sin provocar daños ni cortes. Según Martínez Fernández (2015) la evolución cónica de la caña de bambú varía de consistencia a lo largo del tallo, esta propiedad permite crear diseños de estructuras innovadoras, seleccionando la parte gruesa y fuerte para elementos estructurales que soliciten grandes esfuerzos a compresión (columnas, losetas y entramados), o la parte liviana y elástica para los diseñados a flexión (vigas y viguetas).

## 2.5. Generalidades y morfología del *D. asper*

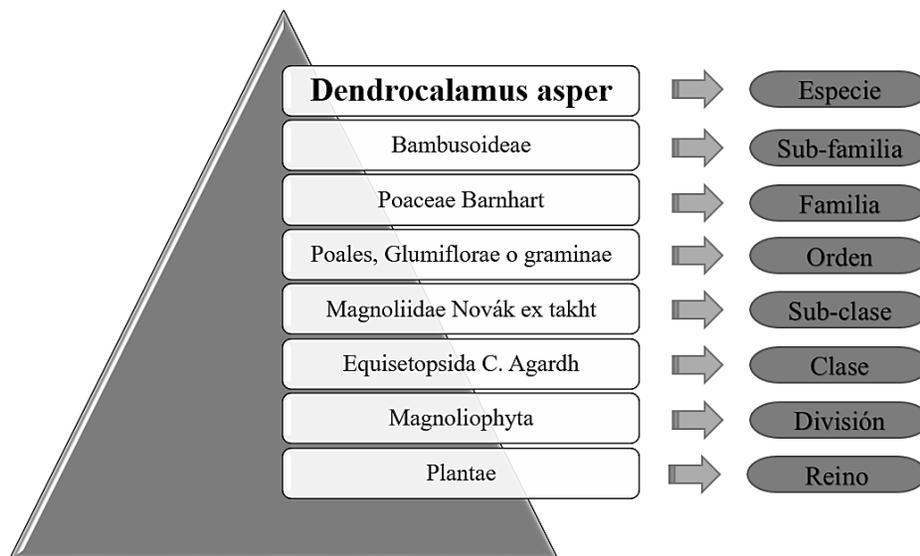
### 2.5.1. Antecedentes

Alrededor del mundo existen diferentes especies de bambú que pertenecen a la familia de gramíneas Bambusiformes o Poaceae, las cuales se las conoce botánicamente como plantas angiospermas monocotiledóneas compuestas por tallos cilíndricos, generalmente huecos, interrumpidos de trecho en trecho por nudos llenos, además se desprenden hojas alternas que nacen de estos nudos y abrazan el tallo, flores muy sencillas dispuestas en espigas o en panojas y grano seco cubierto por las escamas de la flor (Tovar, 1993); como referencia teórica, cabe mencionar que en la familia de gramíneas incluyen varias plantas importantes para la alimentación tales como, el maíz (*Zea mays L.*), el trigo (*Triticum aestivum L.*), el arroz (*Oryza sativa L.*) o la caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*), así se puede tomar en cuenta de manera general la similitud del comportamiento agrícola en esta especie, en cuanto a la siembra, crecimiento y regeneración (Olivier, 2008).

La planta de bambú tiene la capacidad de crecer aisladamente dentro del bosque tropical húmedo entre los grandes árboles o a las orillas de los ríos. Esta amplia gama de especies, a lo largo de la historia, han sido empleadas en diversos fines, debido a sus cualidades botánicas excepcionales que la caracterizan, sin embargo, a pesar de presentar características similares entre especies nativas de diferentes regiones, no es posible su generalización. Hasta el momento no se ha logrado determinar con exactitud el número real de especies de bambú existentes en el mundo, pero se estima que existen alrededor de 107 géneros y 1642 especies; las cantidades presentadas son relativas de autor a autor por motivos de investigaciones particulares y actualizaciones botánicas (Mercedes, 2006).

La marcada diferencia del grupo bambusoideos frente a otras gramíneas se da por el predominio en su estructuración endémica, que cubre: el desarrollo de un sistema de rizomas, la lignificación, la pronunciada ramificación de los cormos, la presencia de pseudopecíolos, la teselación de las hojas ramales y el dimorfismo entre vainas de las hojas caulinares versus hojas ramales (Soderstrom y Calderon, 1979).

En el Ecuador se ha constatado mediante estudios ambientales y forestales, que existen alrededor de 600.000 hectáreas que cuentan con plantaciones de bambú distribuidas en 44 especies nativas y al menos 220 especies adaptadas, pero tan solo se ha aprovechado del 2% al 5% de la totalidad (INBAR et al., 2018). A pesar de la amplia gama de especies de bambú existentes y los cruces naturales entre las mismas, se ha logrado conseguir una división aceptada por varios estudios agrónomos y biotecnológicos internacionales para definir el *D. asper* y se presenta a detalle en la Figura 6.



**Figura 6.** División de la familia del *D. asper*

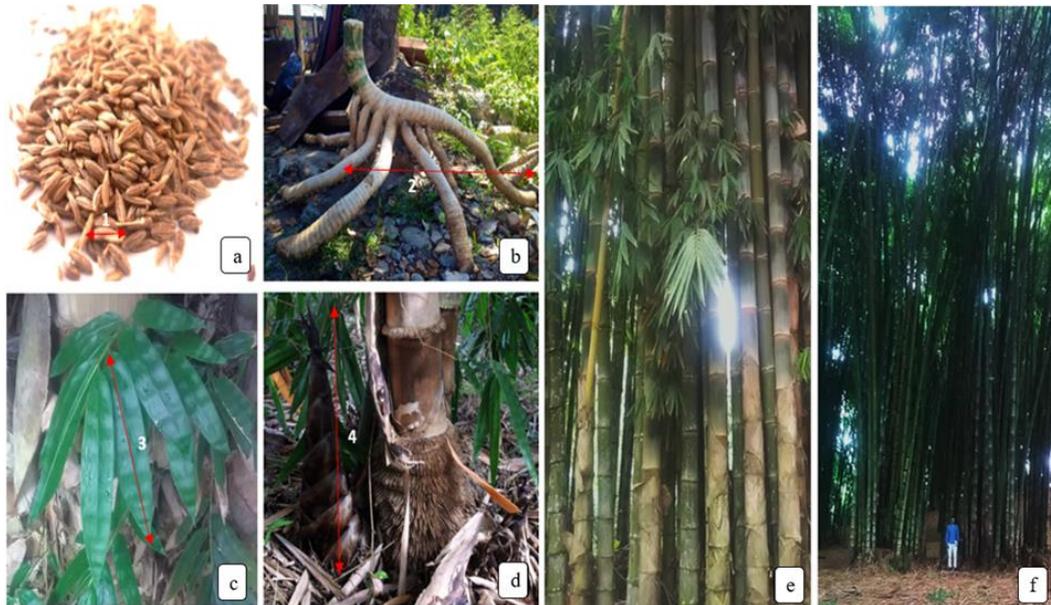
Fuente: Sánchez Martínez (2017)

### 2.5.2. Estructura general

Actualmente los géneros *Dendrocalamus* originarios del sudeste de Asia, Tailandia y Malasia han sido ampliamente introducidos en varias zonas del globo, con condiciones climáticas tropicales, subtropicales y también templadas (Bystriakova et al., 2003), por lo cual, el Ecuador es una región ampliamente beneficiada con este biomaterial a causa de sus ventajosas propiedades climáticas. El *D. asper* al igual que la mayoría de los bambúes presenta un ritmo de crecimiento acelerado, alcanzando un desarrollo del tallo en aproximadamente 14 cm diarios durante los primeros 6 meses, impulso que decrece paulatinamente hasta alcanzar su altura máxima de entre 20 a 30 m en menos de un año, incluyendo su disminución seccional característica desde la base hacia la copa. Se conoce además que, pasados los 4 años de edad, estas características inciden en la planta para que la misma adquiera sus máximas propiedades mecánicas desde el punto de vista constructivo (Dransfield y Widjaja, 1995).

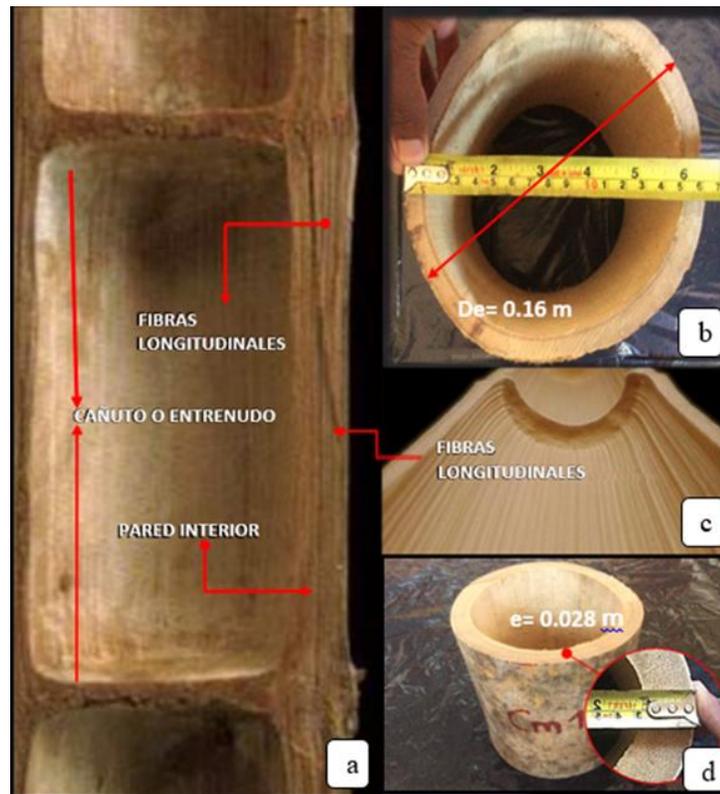
Como se muestra en la Figura 7, la morfología principal que destaca a las especies de este género es la configuración presente en el rizoma y la caña. El rizoma, es un tallo modificado que corresponde a la parte subterránea de la planta, alcanzando hasta 1 m de longitud y que debido a su conformación paquimórfica, puede extenderse a profundidades de entre 80 y 100 cm a través de sus yemas laterales solitarias. El rizoma tiene una gran importancia por ser el órgano en el cual se almacenan los nutrientes que luego se distribuyen a las diversas partes de la planta, adicional a esto, se caracteriza por ser un elemento básico para la propagación del bambú (Mercedes, 2006). La caña o tallo externo del bambú es la parte visible de la planta, está conformada por un cilindro segmentado complementado por ramificaciones originadas en la línea fraccionaria, dispuestas similar a un abanico. Las hojas

de esta especie presentan variedad de tamaños pero mantienen la misma forma física característica la cual es oblongo-lanceolado con una superficie lisa (Qisheng et al., 2002).



**Figura 7.** Morfología general de la especie *D. asper* (a) semillas, dimensiones de 3.5 a 5.0 mm de largo, (b) rizoma con alturas de 0,80 m a 1,00 m en edad adulta, (c) hoja adulta de la especie (0,30-0,45) m de longitud, (d) nuevo brote con alturas aproximadas a 70 cm, (e) culmo y follaje de la planta de bambú, y (f) vista total del conjunto de bambúes

La Figura 8 muestra al culmo de esta especie de bambú, el cual es una concha cilíndrica dividida por diafragmas transversales en los nodos, siendo éstos inicialmente de color verde grisáceo y se vuelven marrón apagado al secarse. Los nódulos inferiores de los tallos jóvenes están cubiertos de cerdas doradas que son el factor más fácil de distinguir de la especie, también los brotes jóvenes se caracterizan por presentar un tono de color marrón oscuro. La longitud del entrenudo varía desde los 25 y 60 cm con un diámetro entre 12 y 18 cm; las paredes del culmo son generalmente muy gruesas pero también muestran una gran variación en este grosor desde 1 hasta 3 cm (Londoño, 2002).

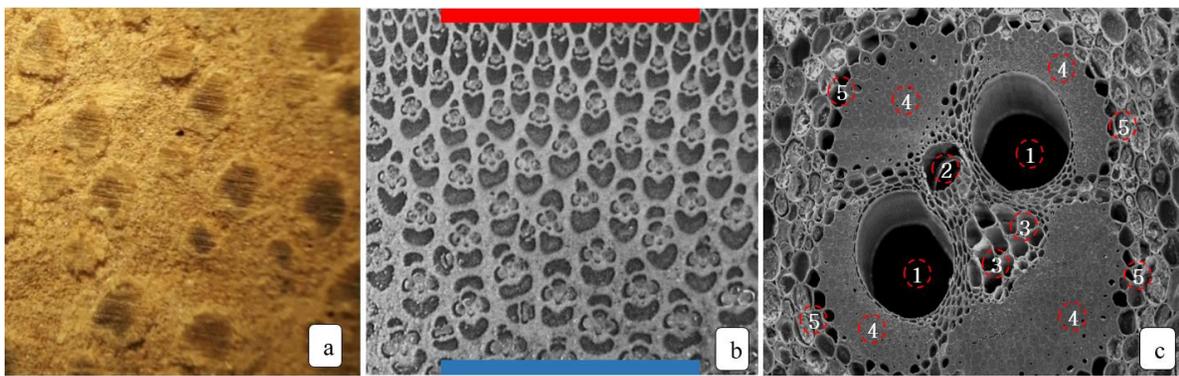


**Figura 8.** Características internas del tallo de bambú (a) vista frontal interna del canuto, (b) corte transversal de un culmo y medición diametral exterior, (c) vista longitudinal interna del canuto, y (d) espesor de la pared de un culmo

### 2.5.3. Estructura anatómica del *D. asper*

La estructura del bambú es un material compuesto, que contiene fibras de células largas y alineadas inmersas en una matriz leñosa (Liese, 1992). Un primer plano de una sección transversal de un culmo de *D. asper* muestra que la distribución de las fibras es variable a lo largo de su espesor, presentándose como un material funcionalmente graduado. Liese (1992) explica que el tejido total del culmo consiste en 50% de parénquima, 40% fibras y 10% de células conductoras. En la dirección axial, la cantidad de fibras aumenta de abajo hacia arriba con la disminución en su contenido de parénquima. Las células parenquimáticas son en su

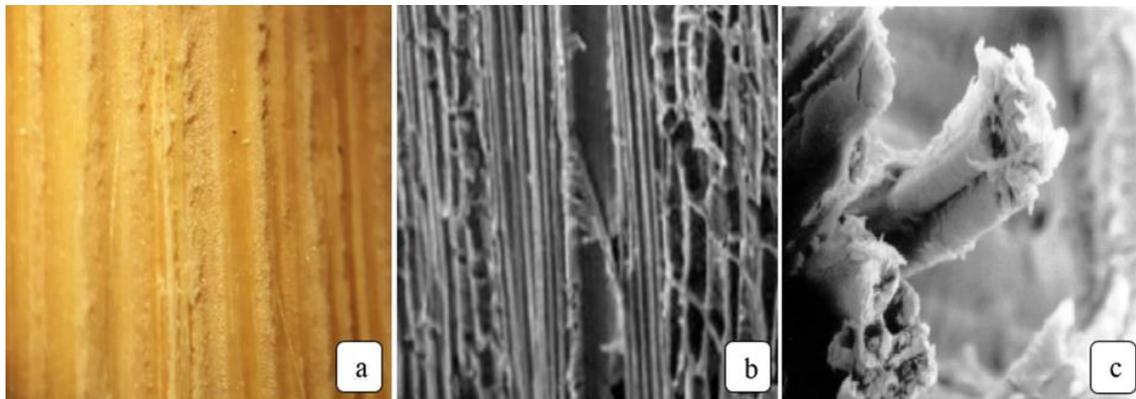
mayoría paredes delgadas y conectadas entre sí por numerosos hoyos simples en las paredes longitudinales, destacando que el tamaño del haz vascular es grande en la capa interna y media, pero más pequeño y más denso en la capa externa. Este haz vascular en el culmo de bambú, contiene dos grandes vasos: la metaxilema y floema (tubos de tamiz con células acompañantes), todos rodeados por las células esclerenquimáticas (ver Figura 9).



**Figura 9.** Estructura vascular interna de una muestra de *D. asper* (vista superior) especificando (a) corte tangencial de una muestra del culmo, (b) variación de haces vasculares: pared externa roja y pared interna azul; y, (c) aumento del corte dónde se observa la parénquima medular con: 1) vasos de meta xilema, 2) floema, 3) protoxilema, 4) tejido esclerenquimático, y 5) tejido parenquimático  
Adaptado de Liese (1992)

A su vez, un análisis radial tangencial llevado a cabo por Grosser y Liese (1971) determinaron que la relación de largo y ancho de las fibras varía entre 150:1 y 250:1. La cantidad de fibras, como vainas o paquetes adicionales, están estrechamente relacionadas con la densidad específica, la cual disminuye dentro del culmo desde la base hacia la copa; el porcentaje de fibra es mayor en el tercio externo de la pared y en la parte superior del culmo, lo que contribuye a definir su esbeltez.

Se han publicado varios estudios sobre las características anatómicas del bambú y su influencia en las propiedades físicas y mecánicas. Latif y Razak (1991) concluyeron que, el paquete vascular correspondiente al tamaño (relación radial / tangencial) y la longitud de la fibra se correlacionaron positivamente con el módulo de elasticidad (MOE) y en límite proporcional. Explicaron además que, el aumento en el tamaño (en su etapa madura) y la longitud de la fibra podría ir acompañada de un aumento en las propiedades de resistencia a compresión y corte, es decir, que el bambú que posee fibras más largas podría ser más rígido, abordando un mayor tamaño en el paquete vascular. La distribución fibrovascular característica en una muestra del espécimen *D. asper* se aprecia en la Figura 10.



**Figura 10.** Distribución fibrovascular de una muestra de *D. asper* (vista frontal) especificando (a) corte longitudinal de una muestra del culmo, (b) Configuración de paquetes fibrovasculares, y (c) Vista aumentada de una fibra fragmentada.

Adaptado de Prates (2013)

#### 2.5.4. Zonas de producción

El bambú es un producto forestal no maderable y su explotación no es restringida en el Ecuador; es cultivado en diversas regiones sin tener como limitante la climatología. La

explotación y aprovechamiento de este biomaterial en gran medida parte de las necesidades de bienes socio-económicos, sustentables y amigables con el medio ambiente.

El bambú es una especie forestal de fácil adaptabilidad por esta razón se lo encuentra en varias zonas a nivel nacional, siendo dos de sus especies las más utilizadas en la construcción (i) *Guadúa angustifolia*, y (ii) *Dendrocalamus asper*. La producción de este biomaterial en los últimos años se ha incrementado de forma acelerada, debido a su rápido crecimiento, resistencia, fácil cuidado y además proporciona belleza paisajística.

En la actualidad, la mayor producción de caña de bambú del Ecuador se encuentra en las provincias de la Costa Ecuatoriana; Guayas encabeza la lista por su masificación de plantaciones, seguida por la provincia de Los Ríos, este análisis inicial justifica la factibilidad de implementar construcciones alternativas para la región litoral, donde el coste del transporte del biomaterial no sería un problema en el sitio de construcción. La provincia de Pichincha, a pesar de ubicarse en una región de clima templado, también forma parte de los tres principales productores de bambú a nivel nacional, confirmando que el espécimen no tiene inconvenientes para desarrollarse en climas totalmente variados.

En la Tabla 3 se presenta un análisis numérico de la capacidad de producción de cada provincia, mostrando un marco de explotación de pequeña, mediana y gran escala, influenciadas mediante la actualización de nuevas tecnologías y una conveniente gestión empresarial; pues además de poseer extensas plantaciones de bambú, es necesario manejar un proceso adecuado en la explotación y aprovechamiento de este recurso natural, considerando un desarrollo sostenible y sustentable.

**Tabla 3***Distribución geográfica del D. asper y otras especies de bambú en el Ecuador.*

<b>Provincia</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Producción poblacional (%)</b>
Guayas	1464,5	31,3
Los Ríos	1174,0	27,5
Pichincha	751,5	17,6
Manabí	375,0	8,8
Esmeraldas	240,0	5,6
El Oro	100,0	2,3
Bolívar	80,0	1,9
Cotopaxi	60,0	1,4
Zamora	13,0	0,3
Pastaza	12,0	0,3
<b>Total</b>	<b>4270,0</b>	<b>100,0</b>

Adaptada de García Pazmiño (2013)

Con base a los datos de producción de bambú en el Ecuador mostrados en la Tabla 3, se evidencia que la mayor disponibilidad del biomaterial se encuentra en la región costera con un 75,5% del total, reafirmando así, la capacidad de crear programas de vivienda económicamente accesibles, utilizando un material sismorresistente que solucionaría de forma rápida y segura la reconstrucción de las viviendas afectadas por el último terremoto. INBAR et al. (2018) mediante encuestas y capacitaciones brindadas a la población, sostienen que desafortunadamente las provincias con más oferta en plantaciones de bambú se encuentran en manos de pequeños productores, lo que implica afirmar que, el nivel de industrialización del

biomaterial no cuenta con suficiente apoyo gubernamental, sin mencionar el escaso conocimiento en cosecha y explotación que se tiene.

En resumen, existen zonas con alta producción de bambú que no son aprovechadas, puesto que se subestiman o desconocen las grandes potencialidades de este biomaterial; convirtiéndose en un reto y tarea para el Estado, a fin de que se analice, estudie, socialice y promocióne las ventajas de la utilización del bambú como material alternativo en la industria de la construcción.

El Ministerio del Ambiente (MAE) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), como autoridades reguladoras, controlan y administran el aprovechamiento de los recursos naturales, a través del desarrollo y uso de herramientas tecnológicas con talento humano capacitado. Partiendo desde esta perspectiva, estas entidades de Gobierno han logrado desarrollar gradualmente un “Sistema de Administración Forestal (SAF)” el cual se ha dedicado a impulsar el valor del sector forestal en las políticas nacionales (MAGAP, 2017).

Planes y programas de aprovechamiento forestal, como el mencionado en el párrafo anterior, permiten a los grandes y medianos productores incursionar en la siembra, cosecha y reforestación del bambú. Con estas competencias, el Gobierno pretende crear una “mancha nativa” de la cual se pueda generar nuevos sectores estratégicos de empleo y comercio, potenciando al biomaterial a nivel artesanal y estructural.

### **2.5.5. Planificación forestal sustentable**

INBAR et al. (2018) estiman que por cada hectárea de producción se pueden obtener 1200 culmos de bambú en sectores secos y hasta 2000 culmos en sectores húmedos. Por esta razón y junto a estrategias y recomendaciones de aprovechamiento de cosecha (planteados puntualmente en el capítulo 3 de esta investigación) se pretende fomentar un modelo de reforestación que permita desarrollar óptimamente el ciclo productivo del bambú, y a su vez potenciar su crecimiento. Para cumplir simultáneamente estos dos grandes procesos se requiere de información agrónoma que evalúe y segmente los requerimientos que conllevan mantener una plantación de rodales para negocio.

Planificar una producción sustentable de bambú demanda un selectivo cuidado del biomaterial desde que inicia su siembra hasta que se cosecha, por lo tanto, los conocimientos forestales impartidos en este campo cumplen con estándares teóricos y prácticos de alto control para incrementar la producción y permitir un completo aprovechamiento del bambú dentro de un ciclo productivo eficiente.

### **2.5.6. Normativas y estudios relacionados con las propiedades físico-mecánicas**

Diversas investigaciones alrededor del mundo, y específicamente en América Latina, comprueban que las propiedades del *D. asper* son óptimas para su uso como material alternativo en la construcción. Sin embargo, existen variaciones en sus propiedades de acuerdo al tipo de suelo, la condición climática, el tratamiento silvicultural, la técnica de cosecha, su edad, la densidad, contenido de humedad, posición en el culmo, disposición nodal y la biodegradación (Lee et al., 1994). La Organización Internacional de Normalización (ISO)

analizando cada uno de estos parámetros y con el fin de garantizar y estandarizar la calidad de los productos, establece el uso de los siguientes reglamentos para el caso de este biomaterial:

- **ISO-22156** “Bambú-Diseño estructural” .
- **ISO-22157-1** “Bambú-Determinación de las propiedades físico-mecánicas” parte 1  
Requerimientos .
- **ISO-22157-2** “Bambú-Determinación de las propiedades físico-mecánicas” parte 2  
Manual de laboratorio .

#### **2.5.6.1. Características físicas**

El bambú es considerado un biomaterial higroscópico, refiriéndose a que siempre contiene agua, misma que recorre toda su estructura cumpliendo la función de nutrir a la planta y permitir su crecimiento. Por lo tanto, los culmos de bambú siempre van a poseer cierta humedad característica proporcional para cada especie. Publicaciones e investigaciones nacionales e internacionales, como las mostradas en la Tabla 4, muestran cifras porcentuales referentes del contenido de humedad para las especies *D. asper* y *Guadúa Angustifolia*. Estos valores describen cuantitativamente el porcentaje adecuado de pérdida volumétrica de agua que los culmos deben poseer para su análisis en laboratorio o su posterior implementación constructiva.

Por otro lado, la densidad representa un parámetro fundamental en lo que se refiere a la utilización cualitativa y cuantitativa de un biomaterial, puesto que la misma influye en todas sus propiedades mecánicas y físicas. Al analizar intrínsecamente esta propiedad en el bambú, se determinó que existen tres maneras de definirla: (i) densidad verde, considerada como parámetro físico que posee la planta en su estado natural y se

la obtiene a través de una muestra bien definida de una sección específica del tronco, (ii) densidad seca, definida como un tipo de densidad artificial porque su obtención implica la utilización de equipos externos de secado para lograr calcularla, y (iii) densidad básica, siendo la más utilizada a nivel industrial e ingenieril y se define como la cantidad de masa seca que existe en un determinado volumen en estado verde. Diferentes investigaciones internacionales muestran la variación seccional longitudinal de esta última propiedad, las cuales se recopilan en la Tabla 4.

#### **2.5.6.2. Características mecánicas**

Desde la perspectiva ingenieril, la biomecánica ha centrado su estudio en comprender el complejo diseño que presentan los materiales naturales y analizar los efectos mecánicos producidos por la concurrencia de sus fuerzas locales internas y externas, sean plantas, animales e inclusive los seres humanos, y sobre sus sistemas biológicos. La biomecánica orientada hacia las plantas ha captado su enfoque científico en los tejidos estructurales como también en los fluidos y materiales incluidos en el sistema (Niklas, 1992). Es importante entender e interpretar el comportamiento de un biomaterial ya que presentan distintas valoraciones en las diferentes direcciones ortogonales (longitudinal, tangencial y radial); características propias de un material ortotrópico. Las Tablas 5, 6, 7 y 8 muestran una recopilación pormenorizada de (i) MOE y MOR paralelo a la fibra en compresión y tracción, (ii)  $G$  y  $\tau_{\max}$  en corte paralelo a la fibra, y (iii) MOE y MOR perpendicular a la fibra en flexión. Cada una de estas propiedades mencionadas fue evaluada en distintas secciones del culmo del espécimen.

**Tabla 4**

*Propiedades físicas del D. asper (ensayos de contenido de humedad y densidad básica).*

ENSAYOS FÍSICOS							
AUTOR	ESPECIE	AÑO	ENSAYO	SEC.	VALOR	UNIDADES	OBSERVACIONES
Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (Estructuras de Guadúa GaK)	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2016		Todo	≤18	%	Los culmos de GaK destinados a la construcción deben ser secados hasta alcanzar un contenido de humedad igual o inferior a la humedad de equilibrio del lugar.
Estándar internacional ISO 22157-1 (Bambú - Determinación de las propiedades físicas y mecánicas P1)	<i>Bambú en general</i>	2004		Todo	12	%	
Red Internacional para el Desarrollo del Bambú y el Ratán Oficina para América Latina y el Caribe - INBAR	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2015		Todo	<19	%	La guadúa debe estar seca, lo que significa que su contenido de humedad debe estar por debajo del valor mostrado
Roland Stulz and Kiran Mukerji Appropriate Building Materials	<i>D. Asper</i> <i>D. Hamiltonii</i> <i>D. Strictus</i> <i>D. Longispathus</i>	1981		Todo	10 a 15	%	
Caracterización físico-mecánica de la Guadua en el municipio de Guaduas Cundinamarca	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2016		B	582,2	kg/m <sup>3</sup>	
				M	611,12	kg/m <sup>3</sup>	
				T	674,86	kg/m <sup>3</sup>	
Dransfield and Widjaja	<i>D. Asper</i>	1995		M	700	kg/m <sup>3</sup>	
Pakhkeree	<i>D. Asper</i>	1997		M	770	kg/m <sup>3</sup>	
Surjokusumo and Nugroho	<i>D. Asper</i>	1995		M-IN	610	kg/m <sup>3</sup>	
				M-N	700	kg/m <sup>3</sup>	

**Tabla 5**  
**Propiedades mecánicas del *D. asper* (ensayo de compresión paralelo a la fibra).**

ENSAYOS MECÁNICOS										
AUTOR	ESPECIE	AÑO	ENSAYO	SEC. CULMO	SIMBOLO	VALOR	UNIDADES	PAÍS	OBSERVACIONES	
Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (Estructuras de Guadúa GaK)	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2016		M	MOE <sub>L</sub>	14000	MPa	Ecuador		
					MOR <sub>L</sub>	37,76	MPa			
Bounsong Sompoh; Vallayuth Fueangvivat; Piyawade Bauchongkol & Waranyu Ratcharoen	<i>D. Asper</i>	2013	Compresión paralela a la fibra	B	MOE <sub>L</sub>	70200	MPa	Tailandia	M.C.=12%	
					MOR <sub>L</sub>	66	MPa			
					M	MOE <sub>L</sub>	54600			MPa
					MOR <sub>L</sub>	70	MPa			
Dinie Awalluddin; Mohd Azreen Mohd Ariffin; Mohd Hanim Osman; Mohd Warid Hussin; Mohamed A; Han-Seung	<i>D. Asper</i>	2017	Compresión paralela a la fibra	T	MOE <sub>L</sub>	52000	MPa	Malasia	M.C.=18,44%	
					MOR <sub>L</sub>	70	MPa			
					B	MOR <sub>L</sub>	73,65			MPa
Carranza Armendariz F. & Taco Álvarez J.	<i>D. Asper</i>	2011	Compresión paralela a la fibra	M	MOE <sub>L</sub>	31358,94	MPa	Ecuador	M.C.=54%	
					MOR <sub>L</sub>	Desestimado	MPa			
					M	MOR <sub>L</sub>	59,84			MPa
Surjokusumo and Nugroho	<i>D. Asper</i>	1995	Compresión paralela a la fibra	M-IN	MOR <sub>L</sub>	57,13	MPa	Malasia	M.C.=14%	
					M-N	MOR <sub>L</sub>	52,42			MPa
Ghavami and Marinhno	<i>D. Asper</i>	2001	Compresión paralela a la fibra	M	MOE <sub>L</sub>	21000	MPa	Brasil		
					MOR <sub>L</sub>	78	MPa			

**Tabla 6**

*Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de flexión perpendicular a la fibra).*

ENSAYOS MECÁNICOS										
AUTOR	ESPECIE	AÑO	ENSAYO	SEC. CULMO	SIMBOLO	VALOR	UNIDADES	PAÍS	OBSERVACIONES	
Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (Estructuras de Guadúa GaK)	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2016		M	MOE <sub>R</sub>	12160	MPa	Ecuador		
					MOR <sub>R</sub>	45,85	MPa			
Carranza Armendariz F. & Taco Álvarez J.	<i>D. Asper</i>	2011		M	MOE <sub>R</sub>	19322,05	MPa	Ecuador	M.C.=30%	
					MOR <sub>R</sub>	Desestimado	MPa		M.C.=30%	
Surjokusumo and Nugroho	<i>D. Asper</i>	1995		M	MOE <sub>R</sub>	19180	MPa	Malasia	M.C.=15,65%	
					MOR <sub>R</sub>	134,43	MPa		M.C.=15,65%	
Amatosa A.T. & Loretero M.E.	<i>D. Asper</i>	2016	Flexión perpendicular a la fibra	B	MOE <sub>R</sub>	19960	MPa	Filipinas	Tratamiento en sal; Ensayo flexión 3 puntos	
					MOR <sub>R</sub>	240,5	MPa			
					M	MOE <sub>R</sub>	26140			MPa
					MOR <sub>R</sub>	212,5	MPa			
N.K. Naik	<i>D. Asper</i>	2002		M	MOE <sub>R</sub>	16373 (-2136,+3646)	MPa	Indio	M.C.=8,3%	
					MOR <sub>R</sub>	193 (-20, +31)	MPa		M.C.=8,3%	

**Tabla 7**  
*Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de tracción paralelo a la fibra).*

ENSAYOS MECÁNICOS										
AUTOR	ESPECIE	AÑO	ENSAYO	SEC. CULMO	SIMBOLO	VALOR	UNIDADES	PAÍS	OBSERVACIONES	
Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (Estructuras de Guadúa GaK)	<i>Guadúa Angustifolia</i>	2016		M	MOE <sub>L</sub>	8310	MPa	Ecuador		
					MOR <sub>L</sub>	117,6	MPa			
Bounsong Sompoh; Vallayuth Fueangvivat; Piyawade Bauchongkol & Waranyu Ratcharoen	<i>D. Asper</i>	2013		B-IN	MOR <sub>L</sub>	385	MPa	Tailandia		
					M-IN	MOR <sub>L</sub>	348		MPa	
					T-IN	MOR <sub>L</sub>	342		MPa	
					B-N	MOR <sub>L</sub>	87		MPa	
					M-N	MOR <sub>L</sub>	101		MPa	
					T-N	MOR <sub>L</sub>	100		MPa	
Dinie Awalluddin; Mohd Azreen Mohd Ariffin; Mohd Hanim Osman; Mohd Warid Hussin; Mohamed A; Han-Seung Lee; and Nor Hasanah Abdul Shukor Lim	<i>D. Asper</i>	2017		B	MOR <sub>L</sub>	232,31	MPa	Malasia		
					M	MOR <sub>L</sub>	200,75		MPa	
					T	MOR <sub>L</sub>	232,8		MPa	
Ghavami and Marinhno	<i>D. Asper</i>	2001		B-N	MOE <sub>L</sub>	11700	MPa	Brasil	M.C.=(8-6)%	
					MOR <sub>L</sub>	73,1	MPa		M.C.=(8-6)%	
					M-N	MOE <sub>L</sub>	20800		MPa	M.C.=(8-6)%
					MOR <sub>L</sub>	118,8	MPa		M.C.=(8-6)%	
					T-N	MOE <sub>L</sub>	18300		MPa	M.C.=(8-6)%
					MOR <sub>L</sub>	116,3	MPa		M.C.=(8-6)%	
					B-IN	MOR <sub>L</sub>	159,3		MPa	M.C.=(8-6)%
					M-IN	MOR <sub>L</sub>	224		MPa	M.C.=(8-6)%
T-IN	MOR <sub>L</sub>	147,1	MPa	M.C.=(8-6)%						
Carranza Armendariz F. & Taco Álvarez J.	<i>D. Asper</i>	2011		M	MOE <sub>L</sub>	28644,68	MPa	Ecuador	M.C.=59%	
					MOR <sub>L</sub>	127,08	MPa		M.C.=59%	
Surjokusumo and Nugroho	<i>D. Asper</i>	1995		M-IN	MOR <sub>L</sub>	220,28	MPa	Malasia	M.C.=14%	
					M-N	MOR <sub>L</sub>	138,03		MPa	M.C.=15,30%

**Tabla 8***Propiedades mecánicas del D. asper (ensayo de corte paralelo a la fibra).*

ENSAYOS MECÁNICOS									
AUTOR	ESPECIE	AÑO	ENSAYO	SEC. CULMO	SIMBOLO	VALOR	UNIDADES	PAÍS	OBSERVACIONES
Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (Estructuras de Guadúa GaK)	<i>Guadúa</i>	2016		M	$\tau_{max}$	7,117	MPa	Ecuador	
Bounsong Sompoh; Vallayuth Fueangvivat; Piyawade Bauchongkol & Waranyu Ratcharoen	<i>D. Asper</i>	2013	Corte paralelo a la fibra	B-IN	$\tau_{max}$	9,7	MPa	Tailandia	
				M-IN	$\tau_{max}$	10	MPa		
				T-IN	$\tau_{max}$	8,4	MPa		
				B-N	$\tau_{max}$	11,1	MPa		
				M-N	$\tau_{max}$	8,4	MPa		
				T-N	$\tau_{max}$	9,9	MPa		
Surjokusumo and Nugroho	<i>D. Asper</i>	1995		M-IN	$\tau_{max}$	11,86	MPa	Malasia	M.C.=14%
				M-N	$\tau_{max}$	12,62	MPa		M.C.=15,30%

## 2.6. Parámetros para un óptimo desempeño mecánico-estructural de las cañas de Guadúa

A continuación, se presenta un compendio evaluado por la normativa NEC-Estructuras de Guadúa - GaK (ver Tabla 9), en la cual se exponen ciertas recomendaciones técnicas y preventivas que deben poseer todas las cañas Guadúa antes de ser sometidas a pruebas de resistencia mecánica o en su defecto, a su uso integral estructural; y, a través de éstas garantizar el correcto funcionamiento del material constructivo.

**Tabla 9**

*Características técnicas de la caña Guadúa como elemento estructural*

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	
<b>Edad para uso</b>	4 a 6 años.
<b>Condiciones para la construcción</b>	El bambú debe estar seco, es decir, su contenido de humedad debe ser igual o inferior a la humedad del lugar.
<b>Durabilidad</b>	Protección contra agentes externos; mediante preservantes hidrosolubles u óleosolubles garantizará el tiempo de vida.
<b>Deformación previa</b>	Los culmos no deberán lucir una deformación del eje longitudinal mayor a 0,33%.
<b>Límite de fisuras</b>	En grieta longitudinal se permite fisuras, pero debe estar contenida entre dos nudos, si la grieta pasa al canuto siguiente no debe tener una longitud superior al 20% del culmo.
<b>Perforaciones por agentes externos</b>	No se admiten culmos que contengan perforaciones causadas por insectos o aves.
<b>Pudrición</b>	No se admiten culmos que evidencien algún grado de pudrición, causado por hongos que enferman el material.

Resumido de la Norma Técnica Ecuatoriana, Estructuras de Guadúa - GaK (2016) y Mercedes (2006)

La normativa nacional y diversas investigaciones relacionadas, han planteado que la metodología que debe seguir la caña Guadúa para su buen desempeño en las construcciones, depende de que en su planteamiento estructural se verifique los siguientes criterios:

- Todos los elementos deben ser diseñados por el método de los esfuerzos admisibles empleando cargas especificadas en el capítulo NEC-SE-CG, así como las cargas sísmicas especificadas en el capítulo NEC-SE-DS.
- Todas las uniones de la estructura se consideran articuladas y no habrá transmisión de momentos entre los diferentes elementos que conformen una unión, salvo si uno de los elementos es continuo, en este caso habrá transmisión solo en el elemento continuo.
- Toda técnica de construcción que cuente con caña Guadúa como elemento estructural y que cumpla con la caracterización técnica (estipulada anteriormente en la Tabla 9) debe utilizar, para efectos de cálculo estructural, los valores de esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad consignados en la Tabla 10 (valores referenciales para estructuras en Guadúa no aplicables en esta investigación).

**Tabla 10**

*Esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad para estructuras con caña Guadúa.*

<b>ESFUERZOS ADMISIBLES, <math>F_i</math> (MPa)</b>			
<b>Tracción paralela</b>	<b>Compresión paralela</b>	<b>Corte</b>	<b>Compresión perpendicular</b>
<b>(Ft)</b>	<b>(Fc)</b>	<b>(Fv)</b>	<b>(F'cL)</b>
19 MPa	14 MPa	1.2 MPa	1.4 MPa
<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD, <math>MOE_i</math> (MPa)</b>			
<b><math>MOE_{prom}</math></b>	<b><math>MOE_{0.05}</math></b>	<b><math>MOE_{min}</math></b>	
12 000 MPa	7 500 MPa	4 000 MPa	

Adaptado de la Norma Técnica Ecuatoriana, Estructuras de Guadúa (GaK) (2016)

## **2.7. Normativas internacionales referentes**

- Indian Standard (Method of Test for Bamboo) IS 6874:2008. First Revision ICS 79.060.20
- Norma Técnica Colombiana NTC 5525 2007-09-26. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadúa Angustifolia Kunth*.
- Norma Técnica E.100 Bambú. Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

## **2.8. Normativa Ecuatoriana**

- Norma Ecuatoriana de la Construcción. Estructuras de Guadúa - GaK NEC-SE-GUADÚA. 2016.

## CAPÍTULO III

### 3. PROCESO DE EXPLOTACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DEL *DENDROCALAMUS ASPER*

En el presente capítulo, se pretende dar a conocer al bambú (*D. asper*) en sus etapas de plantación, aprovechamiento, explotación, reforestación, curado y secado, con el objetivo de mantener un apropiado manejo de la plantación, intensificar la producción y generar el mínimo impacto ambiental en su industrialización. Esta información permite profundizar en los lineamientos que se requiere, tanto en plantaciones ya existentes como en nuevos emprendimientos de cultivo y regeneración.

#### 3.1. Plan de manejo técnico en plantaciones

Para iniciar con el proceso silvicultural del *D. asper*, será necesario el estudio de las exigencias climáticas y los tipos de suelos previos a la siembra para luego detallar los parámetros de corte, siempre enmarcados en un manejo cíclico ecológico.

Actualmente, en lo que refiere a la plantación integral del *D. asper* y otras especies de bambú, los expertos relacionados como La Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR) y EcoPlanet Bamboo, han catalogado a este biomaterial como el producto más valioso del mercado durante las dos últimas décadas, cuya amplia geo-distribución puede constituir un precursor del desarrollo sostenible. La principal característica que motiva a ingenieros forestales, agrónomos, botánicos, civiles y arquitectos al estudio de estos ejemplares, es su singular capacidad de crecimiento, versatilidad y resistencia mecánica, factores que, en conjunto con un tratamiento y

manejo técnico adecuado, superan las exigencias estructurales de los materiales convencionales (hormigón y acero).

### **3.1.1. Factores ambientales y de sitio**

A pesar de que el *D. asper* no es una especie nativa del país, presenta una considerable incidencia territorial debido a su capacidad de adaptabilidad en diferentes condiciones ecológicas y ambientales. La calidad del sitio en el que se pretendería cultivar el bambú es un concepto ambientalmente cuantificable en relación al crecimiento y desarrollo de la especie; y, para evaluar los parámetros físicos en plantación será necesario analizar su densidad poblacional, el estado de madurez, su diámetro y las propiedades del suelo, como agentes inherentes en el desarrollo estructural de la planta (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

En zonas secas el *D. asper* desarrolla mayor espesor en sus paredes celulares, adquiriendo mejores características de comportamiento mecánico frente a los especímenes que crecen en zonas húmedas; por otro lado, los culmos de esta especie desarrolladas en zonas tropicales o bajas, suelen ganar mayor altura longitudinal pero menos conicidad que los culmos que crecen en zonas frías o altas, mismas que, disminuyen su promedio de altura total (MAGAP, 2017).

Para la plantación de bambú es importante seleccionar un lugar con humedad adecuada, específicamente para el *D. asper* el sitio de plantación debe presentar un rango pluviométrico mensual promedio que oscila entre 1000 mm hasta un valor igual o mayor a 4050 mm, es decir, se necesita que lluevan al menos 100 mm/mes durante 6 meses para desarrollar al bambú en su máxima capacidad. La especie como tal, puede crecer y madurar en temperaturas que van

desde 14°C a 36°C, pero las óptimas condiciones se dan en localizaciones con una humedad ambiental relativamente alta, cerca al 80% (Soderstrom y Calderon, 1979).

Los vientos en las zonas de desarrollo del *D. asper* normalmente tienen una velocidad promedio de 4,4 m/s y se les conoce como brisas débiles, pero también alcanzan valores de hasta 12,3 m/s, conocidas como brisas fuertes; sin embargo, cuando los vientos sobrepasan de 22,6 m/s es notorio el daño físico presente al momento de corte y cosecha provocando el deterioro mecánico del biomaterial (Soderstrom y Calderon, 1979).

El tipo de suelo apto para la siembra, crecimiento y posterior cultivo de la presente especie, puede ser areno-limoso, franco, franco-arenoso o franco-limoso. Los perfiles de suelos que presentan texturas gruesas y medias son los ideales, debido a que poseen alta profundidad y buen drenaje, son capaces de retener la humedad necesaria para el desarrollo de la planta, especialmente si el suelo contiene cantidades adecuadas de nitrógeno y silicatos, mismos que promueven un excelente crecimiento y nutrición de los rodales. Adicionalmente, el bambú en su etapa madura desprende altas cantidades de hojas secas, las cuales son vitales para el enriquecimiento del suelo al generar su propia materia orgánica, evitando así degeneración por erosión (MAGAP, 2017). En la Tabla 11, se sintetiza las características específicas de sitio y ambiente necesarias para el desarrollo óptimo de las propiedades físico-mecánicas del *D. asper*.

**Tabla 11***Factores físicos requeridos para un óptimo desarrollo del D. asper*

<b>Factor</b>	<b>Características particulares</b>
Altitud (m.s.n.m.)	40 - 2000
Temperatura (°C)	14 - 36
Humedad relativa (%)	75 - 80
Precipitación (mm)	100
Viento	Brisas débiles o moderadas
Tipos de rocas	Diabasas, cenizas volcánicas, aluviales
Tipos de suelos	Francos, limosos, franco-limosos, franco-arenoso, areno-limoso, franco-arcilloso
PH	5,5 – 6,5
Profundidad efectiva (m)	1,0 – 1,5
Permeabilidad	Moderada a alta
Retención de humedad	Moderada a alta
Drenaje	Moderado a medio

Resumido de MAGAP (2017) y del Manual Silvicultural de la Guadúa (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002)

**3.1.2. Preparación de sitio**

El *D. asper* se caracteriza por ser una planta heliófila por excelencia, es decir, que necesita de la radiación solar directa para su completo desarrollo vegetativo, pues al recibir la luz natural de forma constante permite que su metabolismo y crecimiento sea mayor, alcanzando las óptimas propiedades físicas que lo definen (Widmer, 1990).

La mayoría de las especies de bambú se pueden cultivar fácilmente y en el caso del *D. asper* se ha comprobado su excepcional adaptabilidad con el medio; sin embargo, esto no significa subestimar los cuidados necesarios al igual que una planta nativa normal de su

familia. Para efectuar una plantación se debe definir si el objeto de siembra tiene futuro comercial, conservacionista u ornamental, y así tomar las medidas de preparación específicas sobre el terreno y su entorno, mejorando su completo desarrollo y evitando futuros problemas en la cosecha. (Vongvijitra, 1988).

En las zonas de clima frío, como en la Sierra Andina Ecuatoriana, las mejores regiones para un óptimo crecimiento vigoroso de los rizomas del bambú y en sí para que el cultivo acumule nutrientes, son las que gozan de un período caliente prolongado durante las épocas de cambio de estación, es decir, en los meses de abril a mayo y de septiembre a octubre; en contraste, para las zonas de clima cálido como la Región Litoral, es más fácil el desarrollo de los rizomas por el simple comportamiento natural de la planta, caracterizada por ser una especie de origen tropical y como se había mencionado anteriormente, la luz solar es el mejor aliado para su desarrollo (Soderstrom y Calderon, 1979), sobre todo en las primeras etapas ya que inicialmente el terreno debe estar libre de sombra. En terrenos inclinados y con tendencia a erosionarse, la mejor forma de eliminar la sombra es a través de podas y chapeos, utilizando el método de anillamiento o corona, el cual trata de erradicar completamente las malezas del suelo que se encuentran alrededor de las plantas en un perímetro de 1,5 m a la redonda (Secretaría de Agriculturas, 2015).

El *D. asper* es considerado como una especie que simula hábito forestal, es decir, a medida que va creciendo la planta tiende a formar una curvatura natural que le garantiza protección ambiental; además de generar una cobertura en forma de vainas que previene el embate de agentes patógenos. Desde otro punto, se conoce que este espécimen prefiere un

suelo aireado por lo cual es aconsejable concentrar lombrices que efectúen esta labor. Adicionalmente, tener en cuenta que las hojas y vainas (en conjunto denominado hojarasca) que caen de la planta ya madura no deben ser recolectadas, por el contrario, es aconsejable redistribuir estos componentes por los tallos más cercanos ya que durante su descomposición han de reciclar sílice, magnesio y otros elementos necesarios para la nutrición del bambú (Jaquit, 2000).

### **3.1.3. Marcos de plantación**

Para seleccionar los marcos de plantación es fundamental conocer las características que definen a los rizomas de la especie de bambú (como se había mencionado, el *D. asper* presenta un rizoma paquimorfo), de igual manera se debe conocer la altura que alcanzará la planta y su crecimiento diametral específico. Bajo estos parámetros se diseñará en curvas de nivel el trazado de la plantación de rodales, para establecer el espaciamiento adecuado entre tallos y delimitar el perímetro de sombra que se necesita luego del crecimiento total de la planta (Castaños, 1993).

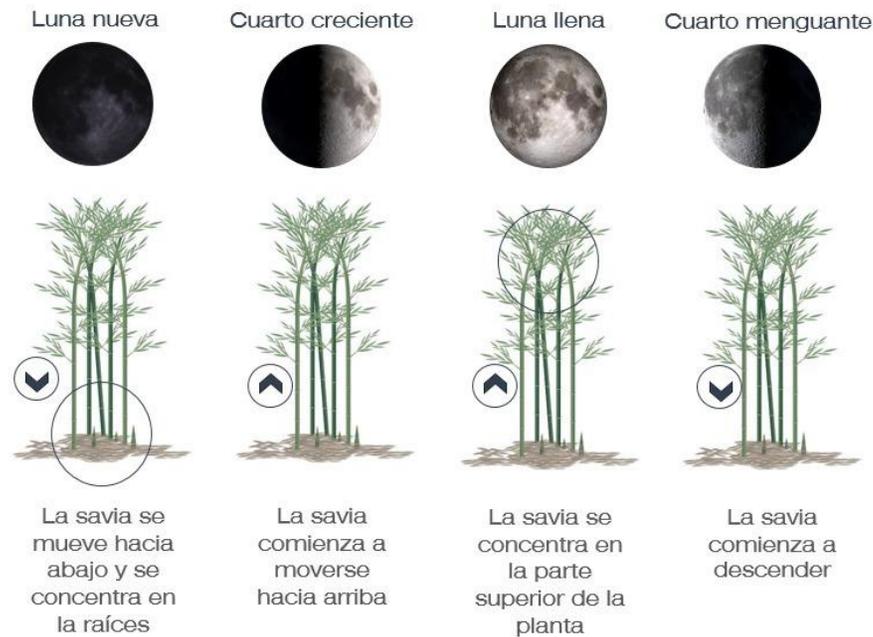
En las plantaciones se recomienda distancias amplias de siembra entre surcos, de 6 a 10 m preferentemente, mientras que el espaciamiento entre plantas podría ser de 3 a 5 m, esto con el fin de lograr una mayor incidencia de los rayos solares sobre el cultivo. Para cada uno de los rodales de *D. asper* es necesario contar con espacios perimetrales de al menos 7 x 7 m y hasta 9 x 9 m en todas sus combinaciones, es decir, todo depende de la situación topográfica del terreno donde se podría realizar trazados rectangulares. Además, su regeneración depende

del área permisible para el desarrollo de nuevos brotes sin generar aplastamiento y pérdida de territorio (Widmer, 1990).

En el marco de plantación también influyen los criterios ecológicos y fisiológicos de mantenimiento, incluyendo la prioridad de ordenamiento y el control de las plagas que acechan al bambú (Mercedes, 2006). Es por ello que, bajo estos precedentes realizados con una apropiada visión técnica de productividad, la plantación aportará amplios beneficios creando un entorno más sostenible a nivel agrícola y con la mínima intervención.

#### **3.1.4. Calendario agrícola**

El calendario agrícola es uno de los factores más representativos que los agrónomos toman en cuenta para la siembra y cosecha de una planta. Básicamente este calendario describe las fases lunares que se presentan a lo largo de cada mes. Parecería que fijarse en estos detalles serían temas sobrenaturales, pero no es así, en física de fluidos científicamente se ha comprobado que la influencia de la luna sobre la tierra tiene un predominio magnético-gravitatorio que afecta a todos los seres vivos al igual que a las mareas (Torres Montenegro, 2012). La fuerza gravitatoria de la luna influye en las plantas durante sus cuatro fases distintivas (ver Figura 11), desde la perturbación en la fotosíntesis hasta la germinación de las semillas, afectando a los movimientos de ascenso y descenso de la savia desde las raíces hasta la altura final de la planta (Thun, 2001).



**Figura 11.** Fases lunares y su influencia en las plantaciones  
Derivado de Thun (2001)

A más de la influencia de cada ciclo lunar, es importante poder reconocer cuando la luna es ascendente o descendente (para esto se requiere determinar su altura relativa con un punto referencial durante 2 días consecutivos), ya que en el primer caso la influencia de ésta sobre la savia es más elevada.

Particularmente, la fase lunar que favorece el desarrollo del *D. asper* después del injerto de los primeros brotes es en cuarto creciente. Durante esta fase la savia asciende desde el rizoma hacia la copa provocando un desarrollo acelerado, logrando que el follaje en conjunto con el tallo crezca más que las raíces. También es pertinente acotar que durante esta fase es común que las plantas sean más susceptibles ante enfermedades o plagas, por lo que se debe fijar mayor atención a la implementación de medidas de mitigación inmediatas o emergentes si fuera el caso (Thun, 2001).

### 3.1.5. Siembra o plantación

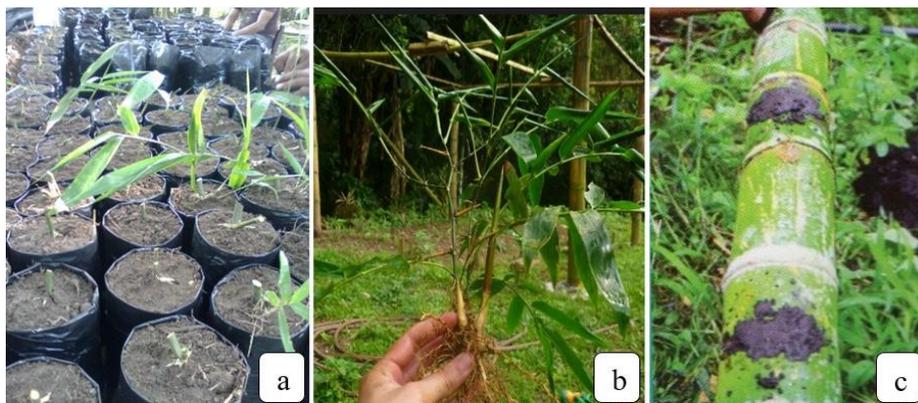
El *D. asper* al ser una gramínea responde rápidamente a la aplicación de urea o abonos orgánicos; sin embargo, según la calidad del terreno se efectuará un análisis químico en función de la masa de producción, donde los fertilizantes a base de Nitrógeno (N), Fosforo (P), Potasio (K) y Boro (B) serán necesarios en concordancia con los requerimientos del suelo. La fertilización puede realizarse al momento de la siembra y repetirse periódicamente a los 6 y 12 meses posteriores (Castaños, 1993).

Las plántulas de *D. asper* deben poseer al menos 20 cm de altura, presentando de 2 a 4 tallos lignificados con hojas verdosas y un buen desarrollo radicular; éstas no pueden plantarse en cualquier momento, su siembra debe corresponder a una época de lluvia lo suficientemente prolongada (el espécimen necesita entre 120 a 150 días para una óptima implantación) para garantizar su desarrollo en las mejores condiciones (Puigdomènech, 1986). Se conocen tres métodos de siembra los cuales se describen a continuación:

**i. Plantación en bolsas de polietileno:** Este método de plantación no permite que las raíces estén expuestas al aire [ver Figura 12 (a)]. Una vez realizado el control de calidad del buen desarrollo foliar y radicular, se transportan las plántulas al lugar de siembra y se cumple con los siguientes pasos: (i) se retira la bolsa plástica del molde de tierra donde se encuentra el chusquín o brote, (ii) se coloca la plántula en el hoyo, (iii) se rellena el hueco con la tierra extraída o con tierra mejorada, y (iv) se aplana la tierra sin compactar exageradamente al suelo (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

**ii. Plantación a raíz desnuda:** En este método se debe tomar en cuenta que el cuello de la plántula debe mantenerse al nivel de la superficie del suelo y las raíces deben conservar su disposición natural [ver Figura 12 (b)]. Para la siembra se procede a (i) colocar la plántula en el hoyo, evitando el doblamiento de las raíces, (ii) mantener la plántula en posición vertical por el cuello, (iii) sacudir levemente la plántula, (iv) rellenar el hoyo con tierra, (v) apisonar la tierra controlando que el cuello se mantenga a la altura adecuada, y (vi) realizar una zanja circular alrededor para recolectar el agua de lluvia (este último paso es opcional). Adicionalmente, si el suelo requiere de abono químico o estiércol fresco, se debe procurar que no quede en contacto directo con las raíces ya que podrían quemarse o pudrirse, por lo que se recomienda aplicar el abono alrededor del hoyo (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

**iii. Plantación de segmentos de tallo:** Este método consiste en rellenar el tallo con agua en sus dos terceras partes y taponarlo con barro [ver Figura 12 (c)], no se necesita pasar por el vivero ya que los segmentos de tallo se pueden cortar cerca del sitio a plantar (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).



**Figura 12.** Métodos de siembra del *D. asper* (a) plantaciones en bolsa, (b) plantación a raíz desnuda, y (c) plantaciones en segmentos de tallo  
Adaptado de Coto (1991)

El transporte de las plántulas debe asegurar su llegada al terreno definitivo en buenas condiciones, para lo cual es necesario (i) regar las plantas el día antes del traslado, (ii) tomar siempre por la bolsa la planta y jamás por el tallo, (iii) realizar el traslado en cajas de madera o cartón resistente, y (iv) evitar la deshidratación de las hojas durante su transporte (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

### **3.1.6. Estados de madurez**

El *D. asper* como planta monocotiledónea no presenta tejido de cambium, que es la sección característica contigua a la corteza en plantas leñosas; por esta razón, no incrementa su diámetro con el paso del tiempo, es decir, luego de su siembra el bambú surge del suelo con un diámetro establecido y conforme pasa el tiempo sigue creciendo verticalmente con la consecuente transformación de sus propiedades fisiológicas (MAGAP, 2017).

Un parámetro importante e indispensable para mantener un correcto control del estado de madurez de la especie, es la edad, pues es un factor que permite determinar las diferentes utilidades que se le dará en el futuro y al mismo tiempo evaluará los diferentes planes de intervención silvicultural (Sánchez Martínez, 2017).

Las cuatro etapas principales durante el desarrollo del bambú son (i) rebrote o renuevo, (ii) tierno o verde, (iii) hecho o maduro, y (iv) seco (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

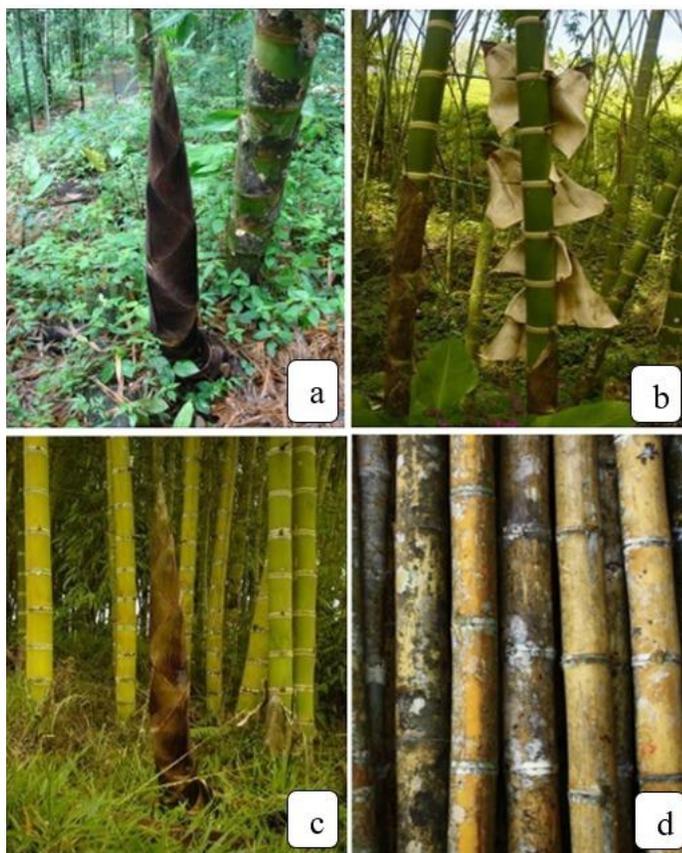
**i. Rebrote o renuevo:** Pertenece a la primera etapa de desarrollo del *D. asper*; se caracteriza por estar permanentemente cubierto por hojas caulinares, además de una ausencia de ramas basales y apicales. Se inicia cuando la sección apical del rizoma emerge del suelo, visualizando el crecimiento del tallo aéreo con su diámetro definitivo y los nudos unidos

asemejando un acordeón cerrado. El desarrollo de esta etapa dura entre 150 a 190 días, el crecimiento es longitudinal y paulatinamente son desplegados los nudos del tallo seccionados por los entrenudos característicos; las hojas son de color café y se encargan de proteger al culmo de los posibles ataques de insectos [ver Figura 13 (a)]. La etapa finaliza cuando las últimas hojas caulinares caen de la parte apical (Añazco y Rojas, 2015).

**ii. Tierno o verde:** Esta etapa se caracteriza porque los tallos adquieren una coloración verdosa intensa y en los nudos aparecen dos bandas blancas que toman el nombre de “bandas nodales” [ver Figura 13 (b)]. La duración de esta etapa oscila entre los 6 y 24 meses (Añazco y Rojas, 2015); durante este lapso, el culmo de bambú se encuentra en estado verde ya que no ha obtenido aún las características de resistencia físico-mecánica que le proporcionarán los años; además, en esta etapa el contenido de humedad de los culmos llega al 100% presentando altos contenidos de azúcares y almidones (Fundación Brethren y Unida et al., 2010; Villanueva et al., 2014).

**iii. Hecho o maduro:** Etapa en la que el tallo toma una coloración amarillenta. En zonas húmedas se destaca la presencia de líquenes, visualmente catalogadas como manchas blancas en el bambú [ver Figura 13 (c)]; a las bandas nodales se les nota en un menor grado visual y el tallo puede tardar entre 4 y 5 años para desarrollar su máxima resistencia biomecánica, dependiendo del clima y las condiciones de sitio (Villanueva et al., 2014). Esta etapa es la adecuada para el aprovechamiento del material donde el contenido de humedad de los culmos oscila entre 60 y 90% (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

**iv. Seco:** Etapa caracterizada por los tallos que no fueron cosechados durante su madurez, mismos que inician un proceso de degradación. El follaje tiende a tomar un color amarillento pálido, las hojas de la planta se desprenden y los culmos empiezan a ser más vulnerables con el tiempo, provocando que cualquier agente externo pudra los tallos o los quiebre [ver Figura 13 (d)]. En esta etapa los culmos de bambú pierden sus propiedades físico-mecánicas paulatinamente y no deben ser utilizadas artesanal o estructuralmente. Se recomienda desechar este material de la plantación y utilizarlo como leña o como abono distribuido en el mismo sitio de plantación (Añazco y Rojas, 2015).



**Figura 13.** Estados de madurez del *D. asper* (a) renuevo o rebrote, (b) tierno o verde, (c) maduro o hecho, y (d) seco  
Adaptado de Fundación Brethren y Unida et al. (2010)

### 3.1.7. Influencia de plagas y enfermedades

Las plantaciones de bambú presentan una afectación de plagas en menor proporción que los sistemas de cultivos convencionales de su misma categoría como el maíz, la caña de azúcar y el centeno; sin embargo, varios agricultores han reportado que insectos de diferentes clases atacan a la planta viva de bambú mientras ésta se desarrolla. El *D. asper*, al igual que otras especies de bambú, posee nutrientes en sus paredes celulares como (i) almidones, que se descomponen por enzimas como la amilasa, (ii) proteínas, que se descomponen por enzimas proteolíticas, y (iii) grasas, que se descomponen por la poca oxidación (Villanueva et al., 2014); sustancias que por naturaleza atraen a plagas como coleópteros (familia de escarabajos), saltamontes, termitas, áfidos (pulgones responsables de perforar los culmos), roedores, micos y demás animales rastreros, quienes roen los rizomas y se comen los rebrotes (Londoño, 2002).

El *D. asper* enfrenta diferentes tipos de plagas en su etapa madura (i) *Pudichmus agemur* (escarabajo adulto), el cual perfora a los rebrotes provocando un nulo desarrollo, y (ii) *Arctidae* (larva de mariposa), la cual se encarga de defoliar a los rodales en un 80 a 90% (Londoño, 2002). Además, cuando los culmos sobrepasan la madurez (etapa seca) presentan mayor vulnerabilidad ante la plaga *Dinoderus minutus* (escarabajo perforador). Existe otro insecto llamado *Gonipterus scutellatus* (gorgojo de bambú), que se encarga de devorar únicamente tallos nuevos en crecimiento provocando que los entrenudos se hagan cortos y se tuerzan. En algunas ocasiones el ataque es tan severo que ocasiona la pérdida total de los culmos, además, este tipo de insecto deja huevos en los tallos tiernos cuya larva posteriormente causará daños internos, impidiendo un óptimo crecimiento (Mercedes, 2006).

Una propiedad física del *D. asper* que provoca la mayor propagación de enfermedades, es su contenido de humedad, ya que los hongos requieren de al menos 18% de humedad para su óptimo desarrollo; si existe exceso de agua por saturación del culmo o escasez de ésta, los hongos no podrán reproducirse fácilmente. Otro punto en desventaja en este espécimen, es su estructura tubular, misma que contiene demasiado aire en sus cavidades longitudinales, provocando el avance acelerado de su descomposición natural (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002). La Figura 14 muestra las plagas más comunes (insectos, hongos y bacterias) que afectan al *D. asper*.



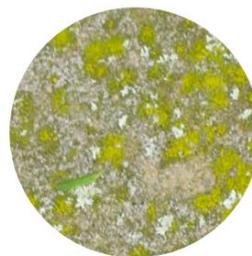
#### **Xilófagos**

- Son las plagas más críticas debido a gran su capacidad de desintegrar las paredes celulares, se alimentan de almidón y azúcares del tejido fibroso causando un grave cambio en las características físicas y químicas del bambú, dando origen a la pudrición.



#### **Hongos Cromógenos**

- Se alimentan de compuestos orgánicos almacenados en la madera y fáciles de digerir. No causan diferencia en sus propiedades internas, pero sí provocan coloraciones opacas consideradas como defectos en producción.



#### **Moho**

- Se alimentan de compuestos orgánicos almacenados en la madera y fáciles de digerir. El moho provoca la muerte del follaje de la planta, la marchitez del tallo y un efecto visual no agraciado. Sin el tratamiento adecuado, con el tiempo la planta muere.

**Figura 14.** Las plagas más comunes que afectan al *D. asper*  
Derivado de Castaño Nieto y Moreno Orjuela (2002)

### **3.1.8. Cosecha y transporte**

Cuando las plantaciones de *D. asper* han alcanzado la madurez necesaria (esto es óptimas propiedades físico-mecánicas), se procede a realizar la selección física para el corte. Para lograr un buen seccionamiento de los tallos es necesario seguir algunos lineamientos que eviten el maltrato ocasionado por cualquier eventualidad durante este proceso, conjuntamente se debe conocer el plan de corte del espécimen con el fin de contribuir a la regeneración y procurar que no se pudra la planta (Contreras y Díaz, 1997).

#### **3.1.8.1. Inventario de plantación o manchas naturales**

El inventario es una actividad que consiste básicamente en realizar una documentación del estado de la plantación. Para un manejo adecuado del *D. asper*, se recomienda emplear un registro al momento de levantar la información durante el conteo, para así, obtener una mejor perspectiva de cosecha en el futuro.

Dentro del inventario del biomaterial es necesario disponer de información cuantitativa y cualitativa del mismo, es decir, determinar el número de culmos totales con su caracterización fisiológica (alturas y diámetros); como también será pertinente proporcionar el estado de madurez de los diferentes rodales en la plantación (MAGAP, 2017). Para optimizar el control en la identificación de los culmos, se recomienda utilizar cintas de colores que permitan clasificarlas por edad (ver Figura 15), siguiendo la marcación tradicional presentada en la Tabla 12

**Tabla 12***Control de la plantación según su estado de madurez*

<b>Identificación</b>	<b>Estado de madurez</b>
Cinta color negro	Rebote o renuevo
Cinta color azul	Tierno o verde
Cinta color rojo	Maduro o hecho

Resumido de MAGAP (2017)

**Figura 15.** Identificación de los culmos de *D. asper* según su estado de madurez (método de cintas)

Fuente: MAGAP (2017)

Si no se dispone de las cintas, otra recomendación es utilizar un spray de color rojo para marcar la edad de los culmos y poder llevar un control de corte a futuro, tal como se lo visualiza en la Figura 16.



**Figura 16.** Identificación de los culmos de *D. asper* según su estado de madurez (método aerosol)

Fuente: MAGAP (2017)

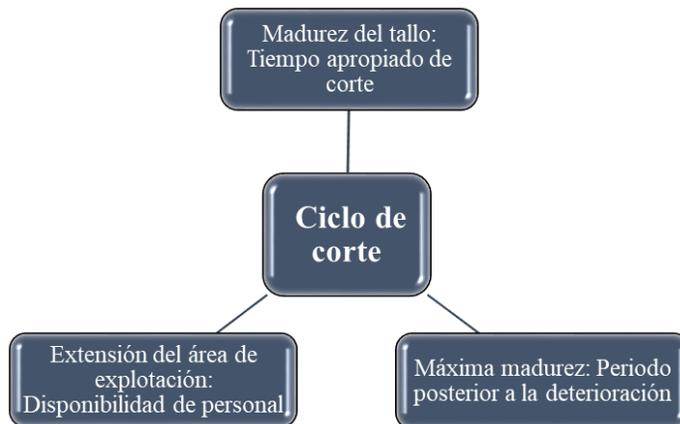
### 3.1.8.2. Plan de corte

Desde los 4 años, los culmos de *D. asper* han adquirido la edad apropiada para ser cosechadas. Si la cosecha se realiza de forma tardía y con períodos bastante extensos provocará la pudrición de los culmos maduros y se limitará agresivamente la aparición de nuevos brotes; por el contrario, si la explotación es excesiva y demasiado continua, los nuevos brotes se regenerarán en cantidad pero tendrán problemas en el desarrollo de su altura y propiedades mecánicas; cabe en este punto mencionar, la importancia de planificar el corte del biomaterial para no alterar el equilibrio natural de la especie (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

El personal a cargo de la plantación deberá evaluar esencialmente la variabilidad en la calidad y cantidad de los brotes de bambú, buscando así, un punto de equilibrio óptimo en la cosecha, en el que se maximice el rendimiento de los recursos

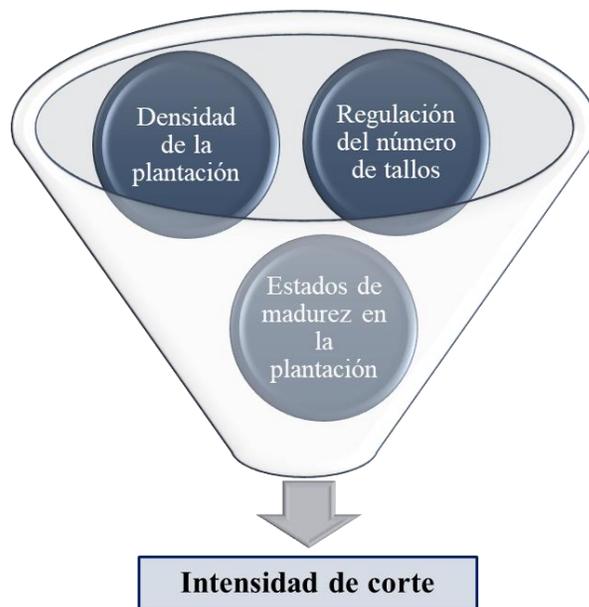
sin la alteración de las propiedades físicas. Para lograrlo, es aconsejable utilizar una bitácora de estudio que considere los siguientes parámetros:

**i. Ciclo de corte:** En una plantación pequeña (menor o igual a 50 Ha), el ciclo de corte no debe ser mayor a un año; si es una plantación grande (mayor a 50 Ha), el ciclo se puede extender hasta 4 años (Añazco y Rojas, 2015; Mercedes, 2006). La Figura 17 muestra 3 indicadores a considerar durante el ciclo de corte del *D. asper*.



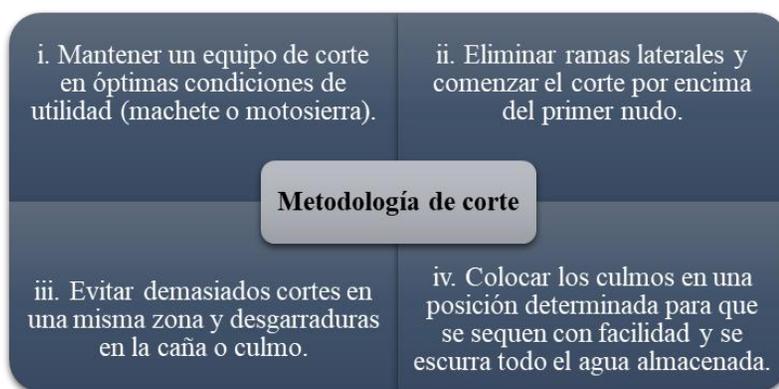
**Figura 17.** Indicadores a considerar en el ciclo de corte  
Derivado de Mercedes (2006)

**ii. Intensidad de corte:** Para este proceso se debe tener un minucioso estudio de las fases de corte, tanto para los tallos jóvenes como para los maduros. La periodicidad de esta actividad está definida bajo ciertas medidas de control que convergen entre sí, evidenciadas en la Figura 18, con el fin de tener un adecuado aprovechamiento de la plantación.



**Figura 18.** Medidas de control para optimizar los recursos en intensidad de corte para una plantación del *D. asper*  
Derivado de Fundación Brethren y Unida et al. (2010)

**iii. Metodología de corte:** En la Figura 19 se puede apreciar varias consideraciones que intervienen en este parámetro.



**Figura 19.** Consideraciones necesarias para una correcta metodología de trabajo durante el corte del *D. asper*  
Derivado de Mercedes (2006)

Para ejecutar exitosamente la planificación de corte se debe (i) calcular el área total de la plantación, sea ésta de producción o protección, (ii) instalar parcelas de muestreo de 20 x 20 m (valor sugerido dependiendo de la extensión de terreno), tantas veces sean necesarias hasta completar el 10% de área total (MAGAP, 2017), y (iii) contabilizar los culmos de bambú (clasificándolas por edad), calcular inicialmente la cantidad de culmos maduros en parcelas para luego llevar el resultado total a hectáreas [ver Tabla 13 (Fundación Brethren y Unida et al., 2010)].

**Tabla 13**

*Plan de corte de los culmos maduros analizado por Ha de plantación*

Análisis por hectárea (Ha) de plantación		
Culmos maduros	Corte o cosecha	Periodo de corte
#	%	meses
1500-2500	25	12
3500	35	18
4000	40	24
> 4000	50	25-36

Resumido de Fundación Brethren y Unida et al. (2010)

Preferentemente, los culmos se deben cortar solo en épocas secas y cuando la luna se encuentra en cuarto menguante (ver Figura 11); se procura además, que la actividad se la realice en las primeras horas del día, entre las 5 y 9 am, ya que en estas horas la planta posee menor cantidad de savia en su interior, lo que permite reducir la acumulación de azúcares y almidones; esto evita que los culmos se rompan con facilidad y sean más resistentes al ataque de insectos xilófagos (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

Al realizar el corte del culmo se debe verificar que éste sea después del primer canuto completo que sale de la tierra, a una altura estimada de 20 a 40 cm sobre el nivel del suelo, procurando que el corte sea inclinado y sobre la terminación del nudo [ver Figura 20 (a)]. El propósito de esta técnica es evitar que el agua se empoce [ver Figura 20 (b)] y genere una futura pudrición (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).



**Figura 20.** Técnicas de corte en los tallos de *D. asper* (a) buen corte, con terminación sobre el nudo, y (b) mal corte, vulnerable a pudrición por empoce de agua

Fuente: Fundación Brethren y Unida et al. (2010)

### 3.2. Aprovechamiento en plantaciones

El aprovechamiento se relaciona estrictamente con la recolección y extracción del biomaterial para su procesamiento industrial o comercial. Se considera una práctica silvicultural que promueve el mejoramiento en la regeneración natural, como también en la composición estructural del bambú (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002).

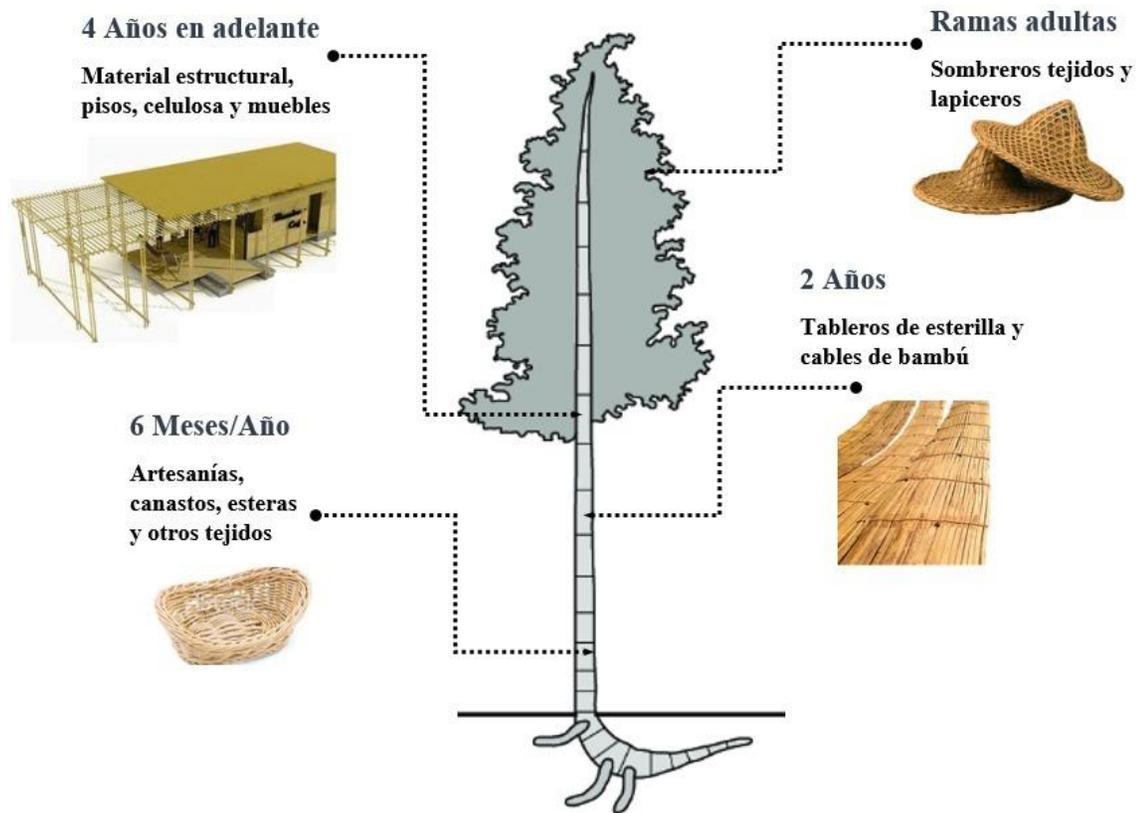
En plantaciones nuevas y con un control regular de la edad de los culmos, se recomienda que el aprovechamiento de los culmos de *D. asper* con fines estructurales, sea a partir del año 4 y máximo hasta el año 6. Lo siguiente a considerar es el período de corte, el cual deberá variar entre

los 12 a 18 meses y la intensidad de corte será del 50% de la plantación permitiendo que los rodales logren una perfecta ventilación y se facilite su regeneración (Londoño, 2002).

En plantaciones aún no explotadas de *D. asper*, se deberá realizar un análisis morfológico del espécimen, evaluando sus hojas, tallos, líquenes y alturas para estimar una edad aproximada que permita procesar un inventario de rodales. Se continuará con la misma cronología del aprovechamiento que se describió para una plantación nueva, con la diferencia de que la primera cosecha será de un 60% de la plantación y con un período mínimo de 12 meses, hasta estabilizar la producción y regeneración del biomaterial (INBAR et al., 2018).

### **3.2.1. Usos y beneficios**

Según la edad y el mercado de destino del biomaterial, éste puede ser utilizado en el ámbito (i) estructural, como material alternativo en la industria de la construcción incentivando su utilización para generar viviendas no convencionales a base de materia prima segura y amigable con el medio ambiente, (ii) artesanal, refiriéndose a la utilización como componente principal en la elaboración de mobiliarios de vivienda, instrumentos musicales, tableros y pisos, y (iii) alimenticio, potencializando los brotes de esta especie como una gran fuente de proteína y fibra. La Figura 21 presenta gráficamente los usos y beneficios del bambú dentro del mercado.



**Figura 21.** Clasificación de las partes comerciales del *D. asper* según su edad y utilidad dentro del mercado  
Adaptada de Hidalgo López (1981)

### 3.2.2. Problemas con el manejo del biomaterial

La morfología adaptativa del *D. asper* ha logrado potenciar sus características físico-mecánicas de acuerdo al entorno en el que se desarrolla; sin embargo, este biomaterial no ha tenido la valoración que se merece en cuanto a sus bondades ecológicas y estructurales. La falta de manejo técnico en las plantaciones ha provocado que paulatinamente el producto se pudra o que la cosecha se estanque en sembríos sin ningún control, desperdiciando espacio, tiempo y dinero (MAGAP, 2017).

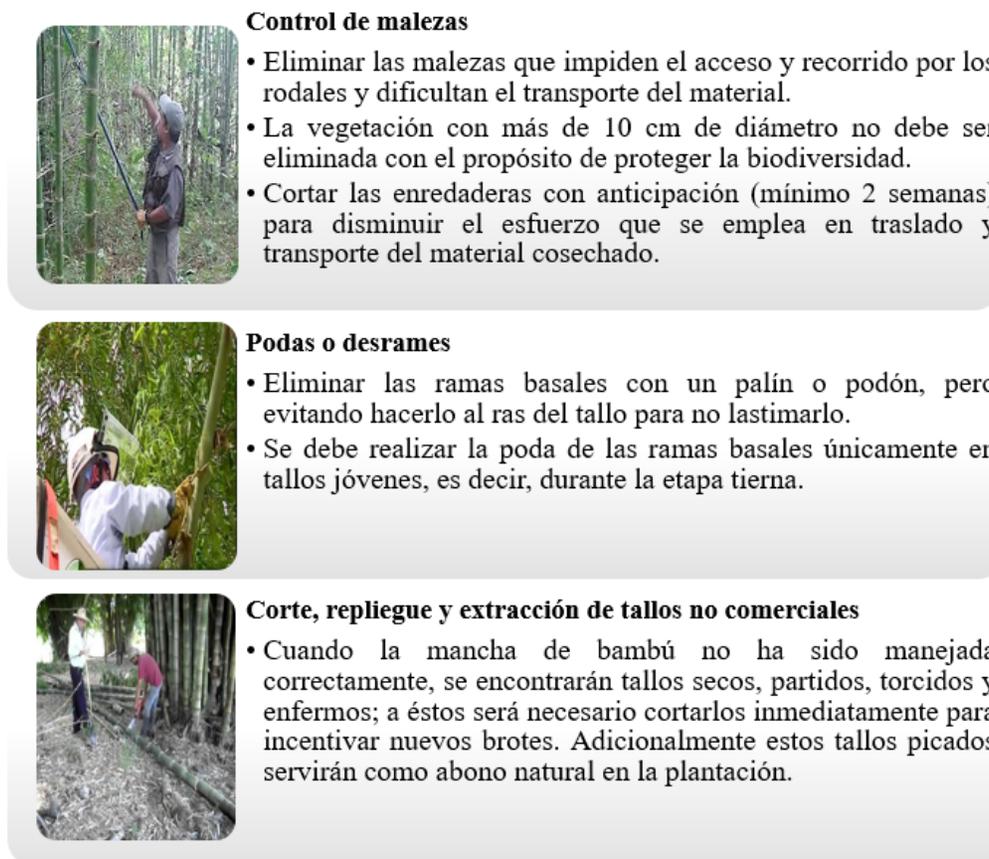
Por otro lado, cuando el biomaterial tiene la atención pertinente en producción se puede presentar otro problema, la sobreexplotación. Este es un tema delicado en cuanto a la producción y comercio, ya que un inadecuado trato no solo afecta a la calidad del producto sino también a la del terreno. La sobreexplotación de los culmos colindantes a los ríos y laderas vulnera la capacidad protectora del suelo, reduciendo los niveles freáticos de la zona, mismos que se encargan de nutrir a la planta mientras se desarrolla (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

### **3.3. Actividades técnicas de explotación**

Las actividades técnicas son necesarias para diseñar un plan silvicultural periódico y controlado, que a su vez se desglosa en una serie de planes sucesivos con el fin de alcanzar una óptima producción sin llegar a la deforestación (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

**i. Georreferenciación forestal.** Técnica de delimitación forestal espacial que tiene como objetivo la creación de una representación cartográfica superficial de una parcela, la cual puede ser realizada mediante instrumentos de registro topográfico como GPSs, ortofotos o el uso de un sistema de información geográfica (conocida como SIG). Esta actividad tiene el propósito de tomar mediciones de alta precisión en lo que refiere a ubicación geográfica de las manchas de caña de bambú en cada familia productora (Sierra, 2013).

**ii. Limpieza de vegetación asociada.** La Figura 22 describe actividades que controlan el crecimiento óptimo del bambusal ya que naturalmente se desarrolla junto a plantas bajas, arbustos y enredaderas que impiden la ventilación del lugar y dificulta la cosecha del trabajador (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).



**Figura 22.** Limpieza de vegetación asociada para el óptimo crecimiento del bambusal  
Derivado de Fundación Brethren y Unida et al. (2010)

**iii. Prevención y control de las plagas.** Para eliminar los riesgos de infección y controlar la propagación de plagas, se requiere talar los tallos enfermos por ser fuente de nuevos contagios; posteriormente estos deben ser quemados. Evitar al máximo el uso de plántulas de vivero enfermas. En la selección de fuentes semilleros para la obtención de propágulos (germen de la misma especie), se deben seleccionar los culmos más sanos y desarrollados, con el fin de mejorar la producción de la plantación (MAGAP, 2017). La Figura 23 describe los parámetros a considerar para prevenir el ataque de plagas en las plantaciones de bambú.



**Figura 23.** Parámetros a seguir para prevenir el ataque de plagas y enfermedades en una plantación del *D. asper*  
Derivado de Castaño Nieto y Moreno Orjuela (2002)

### 3.4. Reforestación de plantaciones de *D. asper* y aspectos silvícolas relacionados

En 1992, el Ecuador contaba con 132 000 km<sup>2</sup> de selva productiva; actualmente, con una tasa de deforestación del 4% anual en la Región Litoral y Amazónica, esta superficie se ha reducido aproximadamente a 45 000 km<sup>2</sup>, no solo por la tala indiscriminada sino también a causa de los procesos de minería, extracción petrolífera y expansión agraria (Sierra, 2013). Por tal razón, es importante proponer medidas de control extractivo sostenible e impulsar la propagación vegetativa de especies de bambú, para contribuir positivamente con el medio ambiente.

El *D. asper* es considerado como una planta propia de reforestación que debido a su sistema radicular, se lo ha catalogado como un excelente regulador de la erosión de los suelos y adicionalmente ayuda a que no se deforme el cauce de los ríos cercanos por efecto de las crecientes (Salazar, 2017).

### 3.4.1. Áreas aptas para la reforestación

Las áreas adaptables para reforestar deberán poseer las mismas características de siembra mencionadas anteriormente en la subsección 3.1.1, verificando siempre si las condiciones de sitio proporcionan una estabilidad natural a la planta para su desarrollo (Castaño Nieto y Moreno Orjuela, 2002). En la planificación para reforestar al bambú se requiere insumos de mano de obra, técnicos capacitados, cronograma de actividades y una apropiada evaluación económica, que en conjunto permiten crear una mancha ecológica significativa de manera estratégica (ver Figura 24).



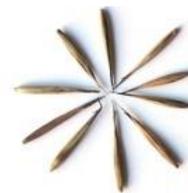
**Figura 24.** Cronología para la creación de una mancha ecológica de *D. asper*  
Derivado de Castaño Nieto y Moreno Orjuela (2002)

### 3.4.2. Propagación o reproducción del espécimen

A continuación en las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29 se describen 5 métodos de propagación utilizados para el *D. asper*, mismos que ocurren por (i) semillas, (ii) segmentos de culmo, (iii) cortes del rizoma, (iv) chusquines, e (v) in vitro.

### Propagación por semillas

Este no es un método práctico debido a sus largos ciclos de floración, en algunas ocasiones se consigue apenas un 50% de germinación con semillas vanas.



**Figura 25.** Método de propagación por semillas  
Derivado de Mercedes (2006)

### Propagación por segmentos de culmo

- Se usan culmos de 1 año de edad con uno o dos nudos por segmento.
- La siembra se la realiza en forma horizontal y a 20 cm de profundidad.
- Los nuevos brotes se pueden observar entre la 2<sup>da</sup> y 4<sup>ta</sup> semana.
- Fungicidas e insecticidas serán aplicados entre los 6 y 12 meses después de ser trasplantados.



**Figura 26.** Método de propagación por segmentos de culmo  
Derivado de Londoño (2002)

### Propagación por cortes del rizoma

- Consiste en sacar los rizomas de 1 a 2 años de edad y cortarlos en secciones de 30 cm
- Excavar hoyos de 1 m de ancho por 0,6 m de profundidad
- Colocar los rizomas acostados con las yemas en ambos lados y cubrirlos con 5 a 10 cm de tierra



**Figura 27.** Método de propagación por cortes del rizoma  
Derivado de Mercedes (2006)

### Propagación por chusquines

- Son culmos exteriores en desarrollo, delgados y con alturas que varían entre 10 y 30 cm.
- Los chusquines son trasplantados en fundas y colocados durante 3 semanas a sombra controlada y alta humedad. Luego se llevan a la zona de crecimiento para su posterior trasplante en el campo.
- Se repican en los canteros (espacio delimitado entre plantas) las plántulas de 1 a 3 años de regeneración natural en el campo.



**Figura 28.** Método de propagación por chusquines  
Derivado de Mercedes (2006)

### Propagación in-vitro o micropropagación

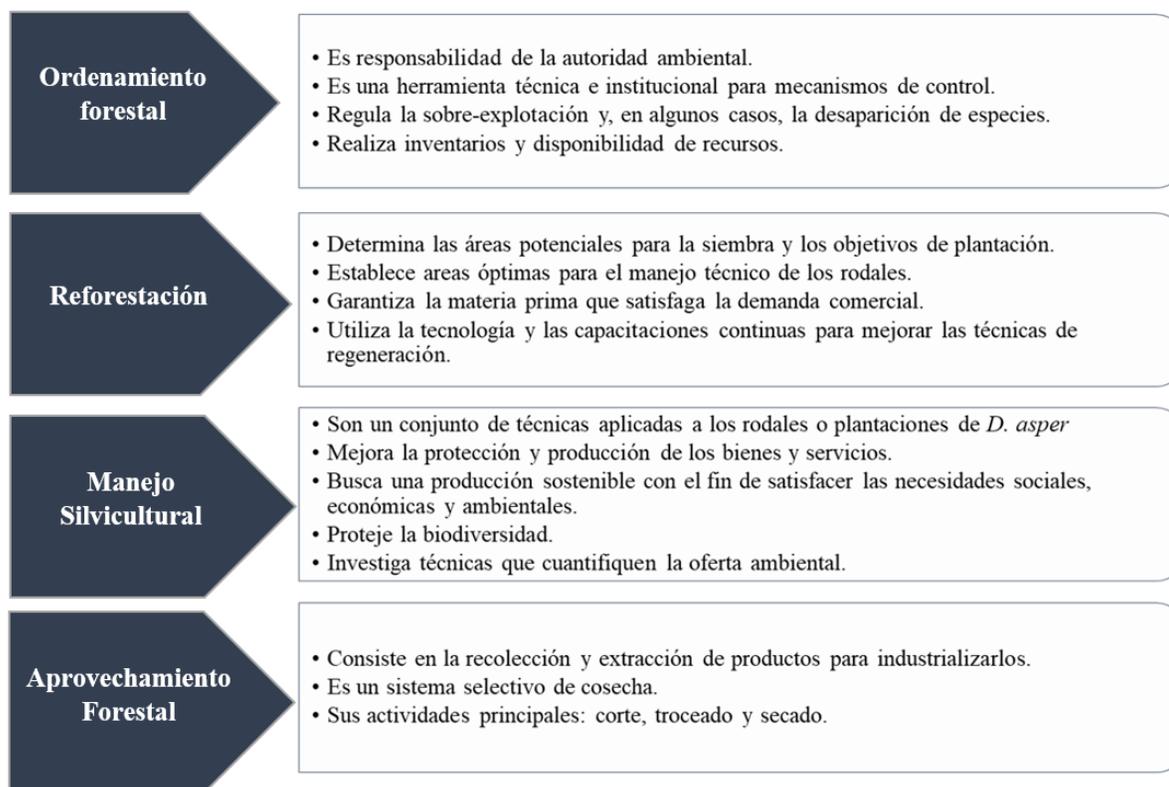
- Proceso realizado en laboratorio mediante el uso de embriones de semilla o yemas auxiliares colocados en un medio de reproducción controlado.
- Su multiplicación es logarítmica ya que puede producir millones de réplicas de la planta original, y existen 3 formas principales de efectuar este método (i) yemas axilares latentes, (ii) inducción precoz del rizoma, y (iii) tratamiento de semillas con hormonas.



**Figura 29.** Método de propagación in vitro  
Derivado de Londoño (2002) y Mercedes (2006)

### 3.4.3. Manejo forestal sostenible

Es un proceso cíclico socio-ambiental avalado técnicamente por entidades gubernamentales competentes, que engloban actividades como (i) ordenamiento forestal, (ii) reforestación, (iii) manejo silvicultural, y (iv) aprovechamiento forestal; la ejecución de cada una de estas actividades es realizada en función de las características detalladas en la Figura 30.



**Figura 30.** Esquema de las actividades fundamentales para un Manejo forestal sostenible  
Derivado de Castaño Nieto y Moreno Orjuela (2002)

### 3.5. Curado del culmo

El *D. asper*, al igual que cualquier otro producto maderable, tiene alta vulnerabilidad al deterioro interno y externo causado por factores abióticos como humedad y temperatura; así mismo puede ser afectado por factores bióticos como los mencionados en la sección 3.1.7.; Júnior et al. (2009) han demostrado que las especies del género *Dendrocalamus* pueden absorber un alto volumen de agua de hasta 100% de su peso en estado seco después de 20 a 24 horas, en su punto de saturación máxima. Por otro lado, Nguyen et al. (2012) en su libro “The effects of thermal modification on the properties of two Vietnamese bamboo species” determinó que la eficiencia de las propiedades mecánicas de ciertas especies de bambú (*D. asper* y *D. barbatus*) llegan a disminuir

entre el 15 y el 58% dependiendo del proceso de tratamiento, provocando un deterioro prematuro y variaciones en la coloración habitual del biomaterial. La perdurabilidad de los culmos no tratados varía entre 1 a 3 años mientras que en los tratados la variación es de 15 a 20 años (Yebra, 2014).

Por lo tanto, es necesario que al culminar la etapa de corte del biomaterial inmediatamente se proceda a la etapa de curado, con el propósito de adquirir durabilidad y evitar al máximo la deficiencia físico-mecánica de los culmos cosechados (Hidalgo López, 1981).

Existen dos métodos generales de preservación del biomaterial (i) tradicional, y (ii) bajo el uso de productos químicos.

### **3.5.1. Método de preservación tradicional**

Es utilizado con mayor frecuencia en áreas rurales donde se desconoce la efectividad de los productos químicos, o a su vez, la inversión económica inicial de estos últimos es muy alta. A continuación se describen 5 procedimientos de preservación tradicional que no requieren el uso de grandes equipos o mano de obra especializada.

#### **3.5.1.1. Curado en la mata**

Es un procedimiento natural muy económico, el cual consiste en recostar a la planta una vez cortada (incluida ramas y hojas) lo más verticalmente posible sobre los otros bambúes, aislándola del suelo a través de una roca o similar (Castrillón y Malaver, 2004). El tiempo que requiere el tallo en esta posición varía entre 3 y 4 semanas; durante este período descenderá el agua y la savia que atraviesa toda su estructura, luego se cortan sus ramas y se lo traslada a un sector cubierto y ventilado. Este

procedimiento permite conservar la coloración natural de los culmos y previene la aparición de rajaduras longitudinales (Londoño, 2002).

#### **3.5.1.2. Curado por inmersión**

Es un procedimiento que consiste en sumergir los culmos recién cortados en agua durante 4 semanas, luego se procede a dejarlos secar por otro tiempo igual o mayor al que se sumergió (Hidalgo López, 1981). En periodos extensos de inmersión el almidón de las paredes celulares se degrada generando permeabilidad en toda su estructura; por el contrario, en tiempos cortos el proceso mantiene al bambú fresco y con más versatilidad para latillar (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

#### **3.5.1.3. Curado con calor**

Este proceso se lo realiza en campo abierto colocando el culmo horizontalmente sobre brasas a una distancia de 30 a 40 cm para evitar quemar el material, esta debe ser girada constantemente con la finalidad de distribuir el calor de manera uniforme completando 5 ciclos rotativos de 5 minutos; el calor generado provoca que el almidón depositado dentro de las células parenquimáticas se destruya y que el agua alojada en el interior de los canutos se evapore. Este método se utiliza también para enderezar bambúes torcidos (Hidalgo López, 1981; Kaur et al., 2016).

#### **3.5.1.4. Curado con humo**

Proceso por el cual se colocarán los culmos de bambú en posición horizontal en el interior de una casa de fogón u hoguera, provocando que el calor del sitio ahúme al material y quede cubierto de hollín; al igual que el curado con calor, se debe controlar

constantemente la uniformidad de la temperatura interna y el tiempo de permanencia que le toma a cada culmo (dependiendo su grosor y longitud) completar el proceso. Este proceso requiere de al menos 4 ciclos rotativos de 25 minutos (Hidalgo López, 1981; Kaur et al., 2016).

### 3.5.1.5. Curado por encalado

Proceso por el cual los culmos de bambú, latillas o paneles destinados a la construcción son recubiertos con cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), lo que le proporciona una mayor vida útil al biomaterial, se reduce además la capacidad de absorción de agua evitando signos de humedad y finalmente le da una estética de coloración blanca visualmente atractiva (Castrillón y Malaver, 2004), tal como se aprecia en la Figura 31.



**Figura 31.** Curado por encalado  
Adaptado de Ubidia (2002)

### 3.5.2. Método de preservación con productos químicos

Estos métodos optimizan el tiempo y garantizan la confiabilidad de preservación, ya que existe una diversidad de productos que funcionan como insecticidas y fungicidas bastante eficientes. En base al medio de disolución, los preservantes se clasifican en dos grupos (i) hidrosolubles, son las sales disueltas en agua y otros ingredientes activos como zinc, dicromato de sodio, bórax y ácido bórico, tienden a ser los más utilizados porque poseen como recurso básico el agua, y (ii) oleosolubles, son los disueltos en aceites como creosota alquitranada, aceite de antraceno y soluciones de creosota (Villanueva et al., 2014). Los productos químicos más utilizados con su dosificación recomendada se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Productos químicos más utilizados para preservar el bambú.*

Productos químicos para preservar el bambú					
Aplicación	Tipo de preservante	Dosificación	Concentración	Años de servicio	
Celosías, paredes, correas, vigas y columnas	i)	Ácido bórico Bórax	1:1	5%	15-20
	ii)	Sales de Bollinden		6%	15-20
	iii)	Sulfato de cobre Dicromato de sodio Ácido acético	5.6:5.6:0.25	6%	15-20
	iv)	Ácido bórico Sulfato de cobre cristalizado Dicromato de sodio	1.5:3:4	8%	15-20
	v)	Pentóxido de arsénico Sulfato de cobre cristalizado Dicromato de sodio	1:3:4	6%	15-20
	vi)	Cloruro de zinc Dicromato de sodio	5:1,5	10%	10
	vii)	Ácido bórico Bórax Dicromato de sodio	2:2:0.5	6%	10
	viii)	Cloruro de zinc Dicromato de sodio	1:1	6%	10
	ix)	Pentaclorofenato de sodio		2%	10
	Composición antiséptica a prueba de fuego	x)	Ácido bórico Sulfato de cobre cristalizado Cloruro de zinc Dicromato de sodio	3:4:5:6	

Adaptado de Hidalgo López (1981)

A continuación se describen 2 procedimientos de preservación del culmo de bambú mediante el uso de productos químicos.

### 3.5.2.1. Preservación por el sistema de inmersión

Como se puede apreciar en la Figura 32, los culmos de bambú se sumergen en un tanque que contiene una solución compuesta de agua con los preservantes químicos destinados para el tratamiento (ver Tabla 14), y su dosificación se efectuará en función de las necesidades de producción o investigación. El tiempo de duración mínimo del tratamiento será de 12 horas, pero dependerá del espesor de las paredes del culmo ya que pueden transcurrir varios días hasta que penetre completamente la solución química (Londoño, 2002).



**Figura 32.** Preservado por inmersión  
Fotografía de las instalaciones de INDUBAMBU. Pichincha - Ecuador

Este tratamiento es uno de los más utilizados por ser económicamente accesible. La capacidad de penetración y absorción del agua con preservante es relativamente menor en culmos recién cortados que en aquellos que están secos y aireados, por consiguiente, cuando el culmo se encuentra en estado fresco (recién cortado) es necesario utilizar mayor cantidad de preservante (Londoño, 2002).

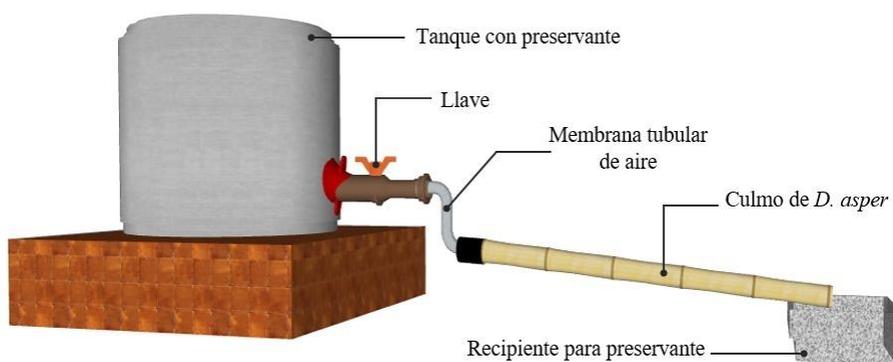
Para inmunizar correctamente los culmos de bambú mediante el procedimiento inmersión se debe (i) perforar longitudinalmente los diafragmas de los culmos mediante una varilla que cubra el largo total, (ii) realizar una limpieza externa de todos los culmos, para evitar que los agentes químicos del preservado pierdan su eficacia, (iii) preparar la solución química hidrosoluble en un tanque que supere la longitud de los culmos, (iv) introducir los culmos en el tanque de preservado por el tiempo que se haya establecido en producción, y (v) extraer los culmos ya preservados del tanque, desalojando totalmente el exceso de líquido químico (Fundación Brethren y Unida et al., 2010). Adicionalmente, se ha comprobado que los químicos solubles en agua caliente son más efectivos que en fría, mejorando significativamente la absorción del producto y reduciendo el tiempo de tratado (Londoño, 2002).

#### **3.5.2.2. Preservación por el sistema Boucherie**

Es un procedimiento por el cual se reemplaza la savia del bambú por una solución de sales hidrosolubles. Este tratamiento es ambientalmente amigable y su confianza radica en que la preservación permanece completamente dentro de los culmos; es altamente eficiente cuando el material se encuentra fresco y recién cortado

(Fundación Brethren y Unida et al., 2010). Existen 2 formas de realizar esta preservación, (i) simple, aplicando principios de gravedad, y (ii) modificado, aplicando principios de presión.

**i. Boucherie simple.** Este procedimiento consiste en desplazar la savia y reemplazarla por el preservante mediante un diferencial de altura, utilizando un tanque abierto con un nivel más alto que la posición del culmo. Uno de los extremos del culmo se conectará al tanque mediante una membrana tubular de aire (ver Figura 33); el tratamiento finaliza al momento en que la solución sale por un extremo del culmo (Hidalgo López, 1981).

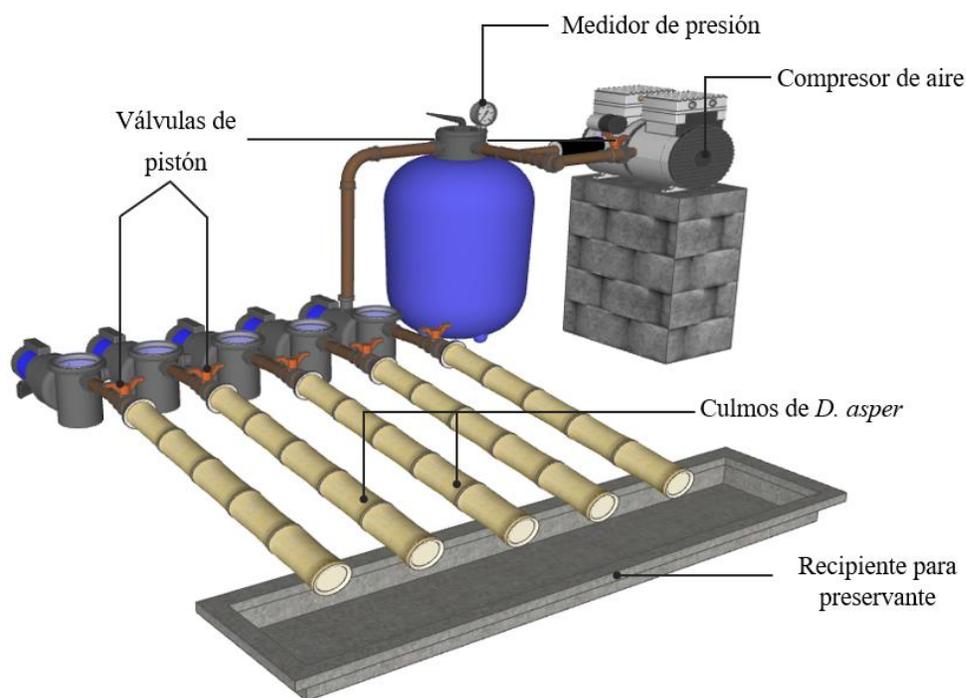


**Figura 33.** Preservación por Boucherie simple (accionado por gravedad)

**ii. Boucherie modificado.** Este procedimiento contiene características similares al simple, pero su principal diferencia radica en el empleo de un tanque hermético, una válvula de pistón servo controlada en la parte superior, un medidor de presión y una tapa con rosca por la cual se llena el tanque de preservante hasta un 75% de su capacidad (ver Figura 34). Luego se aplica de 70 a 110 kPa de presión mediante

una bomba de aire portátil (Hidalgo López, 1981). Adicionalmente cabe recalcar que, este procedimiento permite tratar varios culmos al mismo tiempo.

El procedimiento Boucherie modificado permite tratar varios culmos al mismo tiempo. Por su proceso de absorción y penetración se lo cataloga como el más eficiente, sin embargo debido a su costo solamente es rentable a nivel industrial (Londoño, 2002).



**Figura 34.** Preservación por Boucherie modificado (accionado por presión)

### 3.6. Secado y almacenado

El secado es la última fase para que los culmos de *D. asper* sean utilizados como materia prima. Existen dos procesos fundamentales secado al aire y secado artificial, ambos involucran independientemente diferentes recursos que generan ventajas y desventajas en el producto final.

Durante el secado al aire se procede a colocar los culmos de bambú en posición de tijeras (ver Figura 35), con el fin de crear un efecto de invernadero entre ellos y potenciar el proceso calórico dentro del mismo (Fundación Brethren y Unida et al., 2010). Este es un procedimiento que no requiere elevados recursos económicos pero sí de espacio y su eficiencia depende del clima de la zona.



**Figura 35.** Secado al aire de los culmos en posición de tijeras.  
Fotografía de las instalaciones de INDUBAMBU. Pichincha - Ecuador

Por otro lado, en el secado artificial básicamente intervienen los hornos industriales que aseguran la disposición adecuada de varios culmos de bambú (ver Figura 36). Las ventajas de este procedimiento radican en el tiempo que toma secar los culmos, influyendo directamente en la producción del material derivado como tableros estructurales, pisos y mobiliarios. Se debe controlar estrictamente el tiempo y temperatura a los que se ha introducido el material, puesto que no es conveniente un secado extremo que rigidice los culmos; para esto, se debe planificar un

secado gradual utilizando temperaturas ascendentes, midiendo el contenido de humedad con una muestra diaria que permita verificar el nivel límite de temperatura que pueden soportar los culmos antes de fisurarse. Posteriormente, cuando haya finalizado el secado, es recomendable un tiempo de espera antes de retirarlos, procurando que se estabilice relativamente la temperatura del horno con la del ambiente (INBAR et al., 2018).



**Figura 36.** Culmos de *D. asper* secados en horno.  
Fotografía de las Instalaciones de 3AComposites Plantabal. Quevedo- Ecuador

Luego de haber secado los culmos de *D. asper*, el procedimiento logístico es almacenarlos cuidadosamente en un lugar seco, cubierto y ventilado, que los proteja de la intemperie aislándolos del contacto con el suelo para evitar su deterioro. Para una adecuada conservación de los culmos se recomienda aplicarles aceite de linaza con 20% de trementina (líquido derivado por la destilación de resina de árboles vivos) y posteriormente cubrirlos con cera; estos productos protegerán al biomaterial del blanqueamiento causado por la luz ultravioleta y le proporcionarán un aspecto brillante así como estético (Fundación Brethren y Unida et al., 2010).

## CAPÍTULO IV

### 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DEL *DENDROCALAMUS ASPER*

#### 4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la especie *D. asper* de acuerdo a las normativas especificadas en la sección 2.5.6 de la presente investigación. Se realizó un total de 395 ensayos para determinar los valores característicos de los modos mecánicos de compresión, flexión, corte y tracción, así como sus correspondientes valores de densidad básica y contenido de humedad.

Estas propiedades se determinaron para tres alturas o secciones de culmo (basal, media y superior); asimismo se establece las relaciones físico-mecánicas del *D. asper* en base a regresiones lineales que posteriormente serán aplicadas en el diseño estructural. Adicionalmente, se planteó la elaboración y análisis de esfuerzos admisibles para cada ensayo mecánico cumpliendo los lineamientos presentados en la ISO-22156 (2004) y NSR (2010).

Los resultados obtenidos en este capítulo fueron analizados, comparados y discutidos con investigaciones relacionadas al tema y al espécimen evaluado; por otro lado, éstos serán utilizados en la posterior modelación computacional para validar los ensayos de laboratorio realizados, generando factores de compensación que permitan corregir errores generados por transmisión no uniforme de cargas, falta de calibración de equipos o el uso de acoples artesanales.

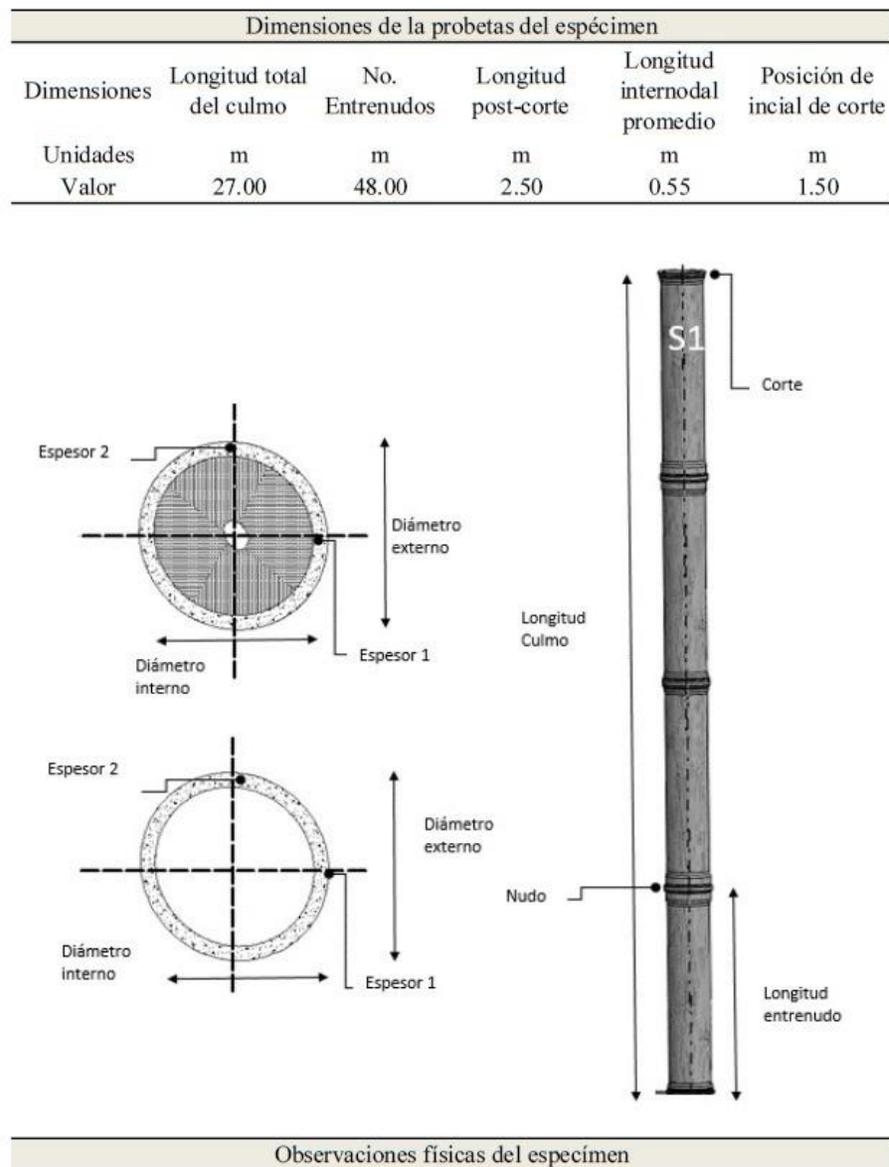
#### 4.2. Materiales, métodos, interpretación y análisis de resultados

El *D. asper* utilizado en el presente estudio proviene del GFE-N°26 ubicado en la ciudad de Quevedo (ver sección 1.2.2). Paralelamente al proceso de clasificación, corte y recolección del material (ver sección 3.1.8.) se fueron evaluando las características físicas requeridas de los culmos in situ (altura de corte, diámetro y longitud) para posteriormente ser transportadas hacia los centros de preservación y curado. La Figura 37 describe gráficamente la cronología seguida para la colección del biomaterial.



**Figura 37.** Cronología para la colección del biomaterial *D. asper* (a) lugar de suministro, (b) identificación del bambusal, (c) corte, (d) rotulado preliminar, y (e) transporte

En la Figura 38 se puede observar el formato de campo utilizado para la descripción y el registro de los culmos de *D. asper* extraídos durante la primera etapa de la colección del material.



**Figura 38.** Formato de campo utilizado para la recolección de culmos de *D. asper*

El tratamiento preventivo utilizado en los culmos de *D. asper* fue un procedimiento químico por inmersión (ver sección 3.5.2.1). Cada culmo fue perforado de manera interna a través de sus diafragmas con una varilla lisa de 20 mm de diámetro [ver Figura 39 (a)], para luego ser sumergidos en una solución química hidrosoluble compuesta al 6% de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) y bórax

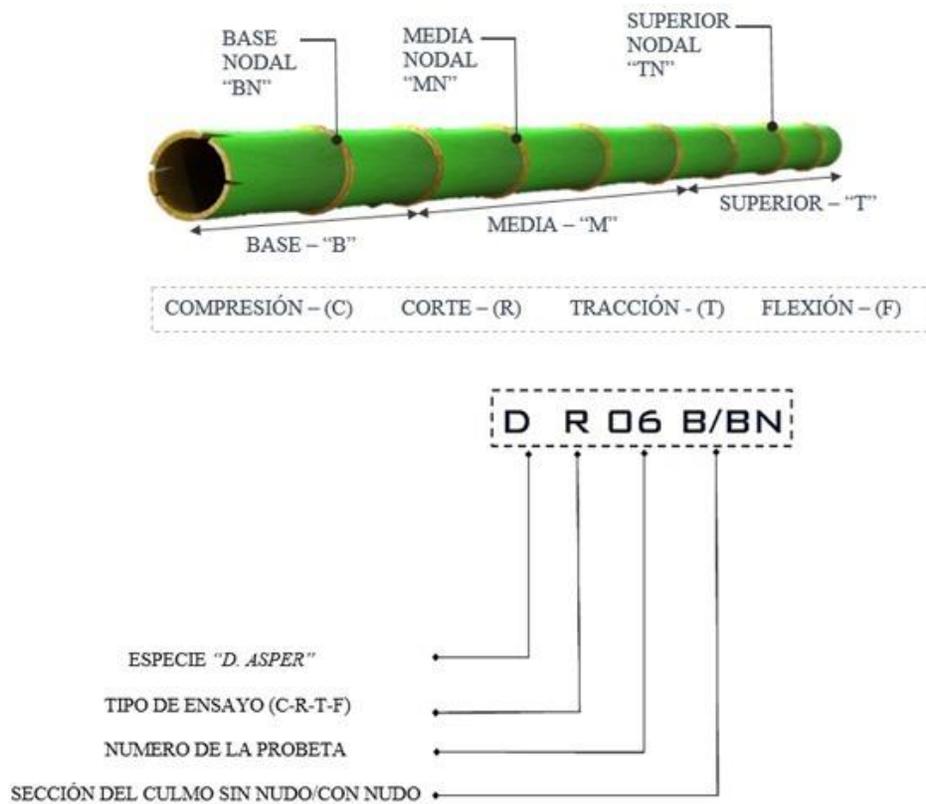
( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), dosificadas en proporción 1:1 durante 4 a 5 días en función de la longitud de los culmos y el espesor de sus paredes [ver Figura 39 (b)]. Posteriormente se estableció un registro inicial con la humedad de los culmos, con el fin de establecer el tiempo aproximado de secado para cada grupo seccional [ver Figura 39 (c)]. Luego se dejó secar los especímenes en hornos de circulación forzada durante 4 días hasta alcanzar una humedad menor a 25% según la normativa ISO-22157-1 (2004), la cual se estabilizará a la temperatura del sitio de acopio durante los posteriores días [ver Figura 39 (d)]. Para alcanzar este valor normativo la temperatura inicial de los hornos fue de 53°C y gradualmente se fue incrementando en 17°C y 18°C hasta alcanzar los 105°C al llegar al último día; exceptuando los culmos de la sección superior los cuales al tener menos espesor fueron retirados al tercer día para evitar fracturas longitudinales.



**Figura 39.** Procedimientos generales para el curado del *D. asper* (a) perforación de diafragmas, (b) proceso de sumersión en solución inmunizante, (c) lectura de temperatura previo al ingreso, e (d) ingreso a hornos de secado

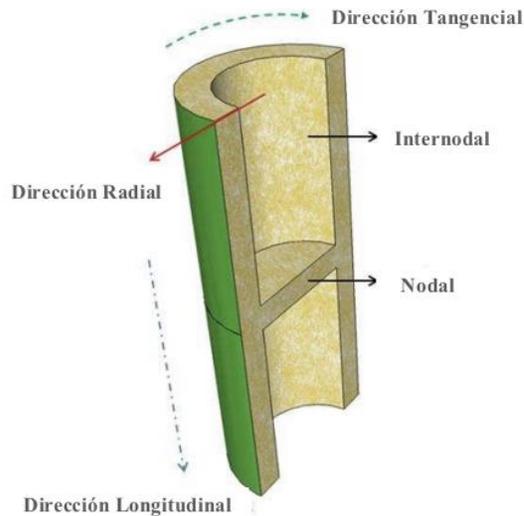
Se realizó un total de 395 probetas acorde a las especificaciones planteadas por la normativa ISO-22157-1 (2004) sección 5.6, donde especifica que la cantidad de probetas para cada ensayo (sea éste físico o mecánico) será mínimo de 12 ejemplares por sección de culmo. Cada probeta de

ensayo se identificó detallando parámetros como (i) nombre científico de la especie, (ii) tipo de ensayo, (iii) número de probeta y (iv) sección del culmo de la cual se extrajo; además, de ser el caso se agrega la letra N para las probetas nodales. En la Figura 40 se presenta un ejemplo característico de identificación de probetas.



**Figura 40.** Parámetros para la identificación de las probetas

El culmo de bambú al ser un biomaterial ortotrópico se comporta de diferente manera dependiendo de la dirección en la cual se apliquen esfuerzos externos. En la Figura 41 se representa gráficamente las direcciones de estudio del presente material [longitudinal (L), tangencial (T) y radial (R)].



**Figura 41.** Direcciones ortogonales en un culmo de bambú  
Adaptada de Huang et al. (2016)

#### 4.2.1. Densidad básica y contenido de humedad

Estas propiedades son predominantes durante la caracterización física de un biomaterial, puesto que inciden directamente sobre las características mecánicas de la especie. La influencia de ambas propiedades en los culmos de bambú varía longitudinalmente desde la sección base hasta la superior y también en dirección radial desde la capa exterior hacia la interior (Grosser y Liese, 1971).

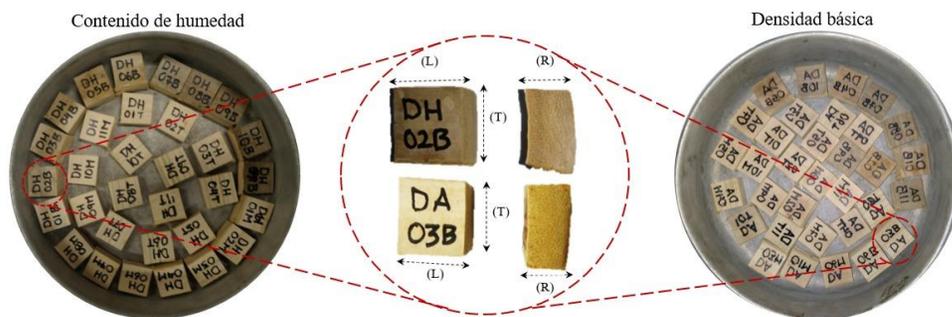
El contenido de humedad representa la cantidad de agua que posee un material y puede localizarse en tres formas, (i) libre, la cual se encuentra llenando las cavidades huecas del culmo, (ii) higroscópica, misma que se confina dentro de las paredes celulares, y (iii) de constitución, conformándose como parte integral de la estructura molecular (Gutiérrez González, 2011). Es así que esta propiedad es un coeficiente obtenido de la relación entre el peso del agua (higroscópica) de la probeta y su peso en estado seco al horno (anhídrido) expresado porcentualmente. Tamarit-Urias y Fuentes-Salinas (2003) presentan una breve

clasificación de los estados del biomaterial en función de su contenido de humedad, considerándose (i) verde entre 30 y 200%, (ii) húmeda entre 20 y 30%, (iii) seca al aire entre 13 y 18%, y (iv) seca al horno menor al 12%.

Por otro lado, la densidad básica representa el nivel de compactación de la materia dentro de una unidad de volumen determinada; esta propiedad se obtiene de la relación entre el peso seco al horno de la probeta y su volumen verde (Schimleck et al., 1999).

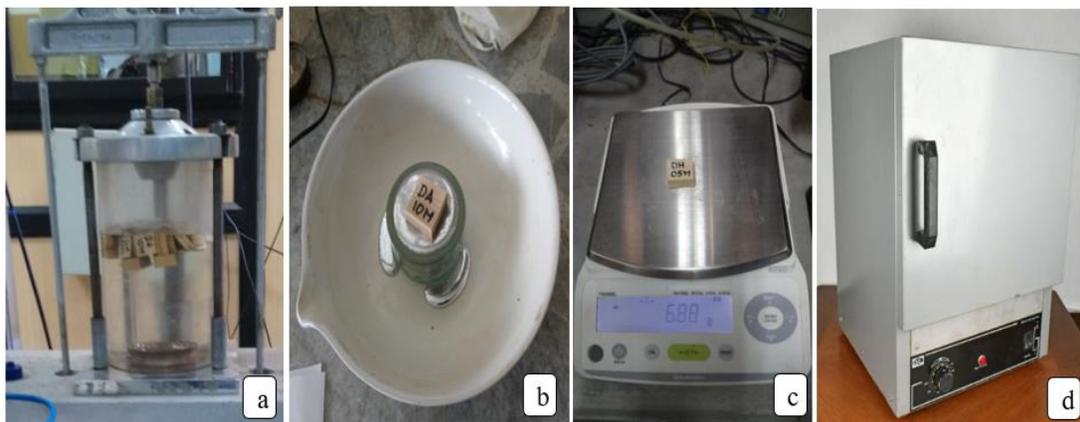
#### 4.2.1.1. Selección y preparación del material

Las probetas empleadas durante estos ensayos se deben extraer inmediatamente después de cada ensayo mecánico. En consecuencia, se obtuvieron 272 probetas válidas del total de ensayos (se estima que la edad de los culmos varía entre 4 y 6 años), distribuidas en 86 piezas para la sección basal, 92 para la media y 88 para la superior. Cuya configuración siguió los lineamientos de la norma ISO-22157-1 (2004) literal 6 y 7, donde indica que las probetas deben presentar una geometría prismática de 25 mm tanto en alto como en ancho (dirección L y T) y un espesor (dirección R) equivalente a la pared natural en cada sección del culmo (ver Figura 42); estas piezas deben ser extraídas cerca de las zonas de falla de cada probeta mecánica.



**Figura 42.** Probetas de *D. asper* empleadas durante los ensayos físicos

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, donde se utilizó un equipo de triaxiales cíclicos marca IPC Global de 110 V con una cámara acrílica de un litro de capacidad [ver Figura 43 (a)] y un elemento químico de densidad conocida [mercurio (Hg) ver Figura 43 (b)], los cuales permitieron simular las condiciones naturales de la probeta y determinar su volumen verde para el caso de densidad básica. En los que se refiere a pesaje y secado para ambos ensayos, el equipo utilizado fue una balanza Kern PCB1000-2 con exactitud de 0,01g [ver Figura 43 (c)] y un horno de convección por gravedad marca Quincy de 0,085 m<sup>3</sup> de capacidad con rangos de temperatura de 0 °C a 300 °C [ver Figura 43 (d)].



**Figura 43.** Instrumentación utilizada durante los ensayos físicos (a) equipo de triaxiales cíclicos marca IPC, (b) mercurio (Hg), (c) balanza digital marca Kern PCB1000-2, y (d) horno de convección por gravedad (0 ° - 300 ° C)

#### 4.2.1.2. Protocolo de ensayo

La normativa ISO-22157-1 (2004) establece que, para el caso de densidad básica, el cálculo del volumen de las probetas deberá tener una precisión mínima de 10 mm<sup>3</sup>. Para la obtención de esta magnitud métrica se utilizó el método de inmersión

en un elemento de densidad conocida (en este caso el mercurio (Hg), el cual posee una densidad de  $13534 \text{ kg/m}^3$ ) debido a que las probetas extraídas poseen irregularidades físicas provenientes desde su origen o constituidas durante los ensayos mecánicos. Se aplicó el siguiente procedimiento:

- Inicialmente, se saturaron las probetas de ensayo con el equipo de triaxiales bajo una presión constante de 100 kPa durante 2 horas, y luego se las conservó en agua por un periodo de 24 horas para no perder el grado de saturación alcanzado (ASTM D2395, 2014)
- Concluida esta etapa, se procedió a aplicar el principio de Arquímedes sumergiendo cada probeta en una determinada cantidad de mercurio previamente pesada, esto provoca que se desaloje parte del elemento químico, cantidad que nuevamente se procede a pesar después de retirar la probeta, la diferencia entre ambas cantidades registradas dará lugar a la obtención de la masa perdida del fluido, que al ser dividida por la densidad del elemento químico se obtiene el valor del volumen del espécimen ensayado (volumen verde).
- Finalmente, estas probetas fueron introducidas en el horno a una temperatura de  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  durante un periodo de 24 horas. Culminado este tiempo, se registró la masa seca de las probetas en intervalos regulares de al menos 2 horas; se considera terminado el ensayo, cuando la diferencia sucesiva de estas mediciones no supere los 0,01g (ISO-22157-1, 2004). Los datos obtenidos del volumen verde y la masa seca al horno permiten calcular el valor de densidad básica mediante la Ecuación (1) proporcionada por la normativa ISO-22157-1 (2004),

$$\delta_b = \frac{m_1}{V_v} * 10^3 \quad (1)$$

donde  $\delta_b$  es la densidad básica en (kg/m<sup>3</sup>),  $m_1$  es la masa de la probeta seca al horno después de la impregnación en (g), y  $V_v$  es el volumen verde de la probeta en (cm<sup>3</sup>).

Por otro lado, para hallar el contenido de humedad se requirió que las probetas sean pesadas en un periodo máximo de 24 horas transcurrido el ensayo mecánico, debido a que en este tiempo la masa de la probeta no experimentará una alta variación. Se aplicó el mismo procedimiento de secado y estabilidad de masa propuesto en el paso final de la densidad básica. El contenido de humedad de cada probeta se calculó mediante la Ecuación (2) proporcionada por la ISO-22157-1 (2004),

$$CH = \frac{m - m_s}{m_s} * 100 \quad (2)$$

donde  $CH$  es contenido de humedad en (%),  $m$  es la masa de la probeta antes del secado en (g), y  $m_s$  es la masa de la probeta después del secado al horno (masa seca) en (g).

#### **4.2.1.3. Resultados**

Las Tablas 15, 16, 17 y 18 presentan los resultados físicos de 276 probetas válidas ensayadas bajo cada modo mecánico, especificando su correspondiente densidad básica y contenido de humedad analizado por sección del culmo. El desglose total de los resultados se presenta en el Anexo de la investigación

**Tabla 15**

*Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de compresión por sección del culmo*

BASE 1.0m DE ALTURA			MEDIA A 6.0m DE ALTURA			SUPERIOR A 18.0m DE ALTURA		
PROBETA Cantidad = 30	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 30	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 30	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)
DA-DH01B	663,71	12%	DA-DH01M	676,38	12%	DA-DH01T	659,40	11%
DA-DH02B	652,61	12%	DA-DH02M	686,64	12%	DA-DH02T	599,00	11%
DA-DH03B	772,77	12%	DA-DH03M	536,63	12%	DA-DH03T	708,07	11%
DA-DH04B	613,50	12%	DA-DH04M	586,00	12%	DA-DH04T	678,82	12%
DA-DH05B	692,25	11%	DA-DH05M	536,63	12%	DA-DH05T	549,36	11%
DA-DH06B	644,26	12%	DA-DH06M	672,32	12%	DA-DH06T	488,70	12%
DA-DH07B	694,07	13%	DA-DH07M	689,52	11%	DA-DH07T	512,14	11%
DA-DH08B	656,25	12%	DA-DH08M	676,38	12%	DA-DH08T	502,83	12%
DA-DH09B	702,36	12%	DA-DH09M	712,40	12%	DA-DH09T	620,00	11%
DA-DH10B	772,58	12%	DA-DH10M	695,32	11%	DA-DH10T	613,00	11%
DA-DH11B	662,47	12%	DA-DH11M	683,98	12%	DA-DH11T	561,33	12%
DA-DH12B	636,33	12%	DA-DH12M	603,21	12%	DA-DH12T	540,71	11%
DA-DH13B	643,29	12%	DA-DH13M	672,00	13%	DA-DH13T	535,90	13%
DA-DH14B	682,89	12%	DA-DH14M	510,00	12%	DA-DH14T	525,12	12%
DA-DH15B	670,47	12%	DA-DH15M	652,00	13%	DA-DH15T	557,00	12%
<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>677,32</b>	<b>12%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>639,29</b>	<b>12%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>576,76</b>	<b>11%</b>
<b>Desviación estándar (S)</b>	45,402	0,004	<b>Desviación estándar (S)</b>	66,685	0,004	<b>Desviación estándar (S)</b>	66,857	0,006
<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,067</b>	<b>0,030</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,104</b>	<b>0,033</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,116</b>	<b>0,050</b>

**Tabla 16**

*Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de flexión por sección del culmo*

BASE A 1.0m DE ALTURA			MEDIA A 6.0m DE ALTURA			SUPERIOR A 18.0m DE ALTURA		
PROBETA Cantidad = 10	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 10	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 10	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)
DH-DA01B	822,84	19%	DH-DA01M	685,25	16%	DH-DA01T	602,55	17%
DH-DA02B	821,46	15%	DH-DA02M	690,38	15%	DH-DA02T	605,43	15%
DH-DA03B	817,80	17%	DH-DA03M	682,50	13%	DH-DA03T	609,21	16%
DH-DA04B	822,84	18%	DH-DA04M	687,25	19%	DH-DA04T	603,07	12%
DH-DA05B	817,80	15%	DH-DA05M	690,38	20%	DH-DA05T	609,45	19%
<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>820,55</b>	<b>17%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>687,15</b>	<b>17%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>605,94</b>	<b>16%</b>
<b>Desviación estándar (S)</b>	2,571	0,018	<b>Desviación estándar (S)</b>	3,394	0,030	<b>Desviación estándar (S)</b>	3,279	0,028
<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,003</b>	<b>0,110</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,005</b>	<b>0,183</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,005</b>	<b>0,179</b>

**Tabla 17**

*Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de tracción por sección del culmo*

BASE A 1.5m DE ALTURA			MEDIA A 6.0m DE ALTURA			SUPERIOR A 18.0m DE ALTURA		
PROBETA Cantidad = 24	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 30	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 30	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)
DH-DA01B	534,30	9%	DH-DA01M	601,65	10%	DH-DA01T	574,01	9%
DH-DA02B	536,52	10%	DH-DA02M	586,36	9%	DH-DA02T	562,15	9%
DH-DA03B	531,30	10%	DH-DA03M	588,67	10%	DH-DA03T	561,36	9%
DH-DA04B	535,07	9%	DH-DA04M	580,52	9%	DH-DA04T	585,85	9%
DH-DA05B	526,85	10%	DH-DA05M	591,57	10%	DH-DA05T	584,80	8%
DH-DA06B	538,42	9%	DH-DA06M	595,12	9%	DH-DA06T	578,36	8%
DH-DA07B	535,98	9%	DH-DA07M	594,39	10%	DH-DA07T	565,28	9%
DH-DA08B	538,71	10%	DH-DA08M	592,86	9%	DH-DA08T	578,49	9%
DH-DA09B	548,80	10%	DH-DA09M	598,15	10%	DH-DA09T	572,30	9%
DH-DA10B	550,59	9%	DH-DA10M	598,06	9%	DH-DA10T	557,85	9%
DH-DA11B	557,15	10%	DH-DA11M	605,16	10%	DH-DA11T	576,66	8%
DH-DA12B	555,00	9%	DH-DA12M	593,01	9%	DH-DA12T	568,53	8%
			DH-DA13M	598,15	10%	DH-DA13T	561,69	9%
			DH-DA14M	593,33	9%	DH-DA14T	560,32	9%
			DH-DA15M	601,16	10%	DH-DA15T	563,86	9%
<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>540,72</b>	<b>9%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>594,54</b>	<b>10%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>570,10</b>	<b>9%</b>
<b>Desviación estándar (S)</b>	9,725	0,005	<b>Desviación estándar (S)</b>	6,320	0,005	<b>Desviación estándar (S)</b>	9,207	0,007
<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,018</b>	<b>0,050</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,011</b>	<b>0,055</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,016</b>	<b>0,085</b>

**Tabla 18**

*Resultados de la densidad básica y el contenido de humedad determinado en el ensayo de corte por sección del culmo*

BASE A 1.0m DE ALTURA			MEDIA A 6.0m DE ALTURA			SUPERIOR A 18.0m DE ALTURA		
PROBETA Cantidad = 26	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 26	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)	PROBETA Cantidad = 20	Densidad básica $\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad CH (%)
DH-DA01B	652,61	12%	DH-DA01M	486,33	12%	DH-DA01T	468,14	11%
DH-DA02B	643,29	12%	DH-DA02M	508,54	11%	DH-DA02T	438,49	11%
DH-DA03B	644,26	12%	DH-DA03M	558,94	12%	DH-DA03T	466,54	11%
DH-DA04B	616,70	12%	DH-DA04M	488,44	12%	DH-DA04T	458,83	11%
DH-DA05B	652,60	13%	DH-DA05M	535,21	12%	DH-DA05T	488,70	11%
DH-DA06B	636,33	12%	DH-DA06M	570,16	12%	DH-DA06T	561,33	12%
DH-DA07B	618,01	12%	DH-DA07M	683,98	12%	DH-DA07T	520,18	11%
DH-DA08B	694,07	13%	DH-DA08M	608,79	12%	DH-DA08T	535,90	11%
DH-DA09B	628,72	12%	DH-DA09M	689,52	11%	DH-DA09T	525,12	11%
DH-DA10B	613,50	12%	DH-DA10M	564,46	12%	DH-DA10T	540,71	12%
DH-DA11B	772,77	13%	DH-DA11M	672,32	11%			
DH-DA12B	722,07	12%	DH-DA12M	686,64	12%			
DH-DA13B	772,77	12%	DH-DA13M	558,76	12%			
<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>666,75</b>	<b>12%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>585,55</b>	<b>12%</b>	<b>Promedio (<math>\chi</math>)</b>	<b>500,39</b>	<b>11%</b>
<b>Desviación estándar (S)</b>	56,149	0,004	<b>Desviación estándar (S)</b>	75,628	0,004	<b>Desviación estándar (S)</b>	41,479	0,004
<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,084</b>	<b>0,036</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,129</b>	<b>0,037</b>	<b>Coef. de variación (CoV)</b>	<b>0,083</b>	<b>0,038</b>

#### 4.2.1.4. Discusión

De acuerdo a los resultados analizados sobre cada una de las probetas de *D. asper*, se determinó que el contenido de humedad seccional promedio presentó el 12% para los ensayos de compresión y corte, mientras que los ensayos de tracción y flexión obtuvieron valores del 10% y 16% respectivamente, todo esto a razón del equilibrio promedio en la humedad del espécimen dentro de la zona en que se realizó el ensayo mecánico. La NEC-SE-GUADÚA (2016) en su Apéndice 3 establece un equilibrio menor o igual a 15,4% para la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, demostrándose a su vez que los resultados de esta investigación se encuentra dentro del mismo orden de magnitud que los expuestos por Stulz y Mukerji (1993) en la Tabla 4 para los géneros *Dendrocalamus*.

La densidad básica para los ensayos de compresión, corte y flexión presentó una variación seccional promedio a lo largo del culmo de la especie *D. asper*, tomando valores máximos en la sección base que van desde 820,70 kg/m<sup>3</sup> y disminuyen relativamente hacia la superior con valores mínimos de hasta 464,14 kg/m<sup>3</sup>. Lo acotado evidencia la configuración fibrovascular descendente típica del espécimen (desde la base hacia la copa) conforme a las propiedades físicas del sitio de siembra en la ciudad de Quevedo, Los Ríos (Liese, 1992). En relación a los resultados evaluados para la sección media analizada por Dransfield y Widjaja (1995), Pakhkerree (1997), Surjokusumo y Nugroho (1995) en cuanto a los ensayos de compresión y flexión (ver Tabla 4) se puede evidenciar que la variación de resultados no exceden de 1,09 veces respecto a los valores nominales de este estudio para los mismos modos mecánicos,

esto a razón de que la edad estimada de los especímenes evaluados coincide con la de los autores (4 y 5 años). Particularmente, el ensayo de tracción presentó una variación seccional promedio con valores de densidad básica similares desde la base con 540,72 kg/m<sup>3</sup> hacia la parte superior con 570,10 kg/m<sup>3</sup>, destacando que la mayor concentración de fibras se encuentra en la zona media del culmo con 594,54 kg/m<sup>3</sup>, lo cual marca una diferencia ascendente del 10% con la sección base y del 3% con la superior, esto ocurre debido a que la muestra poblacional fue tomada en culmos de diferente edad, aproximadamente entre 4 y 6 años (Khan, 1962).

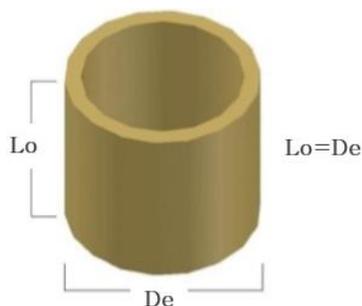
#### **4.2.2. Compresión paralela a la fibra**

El ensayo de compresión paralelo a la fibra se establece para determinar el esfuerzo que ejerce el material ante una carga de aplastamiento que intenta deformar su estructura (Gere y Timoshenko, 2009), proceso utilizado para establecer una similitud ante el esfuerzo que puede soportar una columna o un entramado del material preseleccionado.

##### **4.2.2.1. Selección y preparación del material**

Un total de 45 probetas fueron extraídas para el modo mecánico de compresión, las cuales se obtuvieron equitativamente de la sección basal (15), media (15) y superior (15) del culmo tratado (la edad estimada varía entre 4 y 5 años), siguiendo los lineamientos de la normativa ISO-22157-1 (2004) literal 9, donde se especifica que las probetas serán internodales y su longitud ( $L_0$ ) tendrá igual dimensión que diámetro externo ( $D_e$ ), tal como se aprecia en la Figura 44. Además se debe procurar la perfecta

nivelación horizontal de las caras externas de la probeta con una desviación máxima de 0,2 mm para garantizar una adecuada distribución de la carga aplicada.



**Figura 44.** Dimensiones nominales de las probetas para el ensayo a compresión

Las Tablas 19, 20 y 21 presentan las propiedades geométricas de cada probeta ensayada especificando su longitud, diámetro externo, espesor de las paredes, y el área respectiva para cada sección del culmo; éstas fueron extraídas a alturas nominales de 1 m (sección base), 6 m (sección media) y 18 m (sección superior), obteniendo así un mapeo del tejido estructural completo de la especie.

**Tabla 19**

*Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección base  $h=1.0$  m)*

PROBETA	Longitud	Diámetro externo	Espesor	Área
	Lo (mm)	De (mm)	e (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
DC01B	154,00	161,25	9,13	4360,97
DC02B	149,50	156,75	9,50	4394,70
DC03B	122,00	124,50	9,25	3349,13
DC04B	155,50	156,15	9,78	4495,04
DC05B	130,50	129,50	10,25	3840,01
DC06B	148,00	158,25	9,00	4219,94
DC07B	132,50	125,75	9,13	3343,29
DC08B	148,50	155,75	9,38	4311,10
DC09B	143,00	136,75	12,00	4702,96
DC10B	149,50	136,00	12,00	4674,69
DC11B	148,50	138,50	13,00	5125,51
DC12B	152,00	171,75	12,13	6080,41
DC13B	145,00	145,65	15,33	6274,49
DC14B	144,00	142,75	14,00	5662,72
DC15B	151,50	138,50	12,75	5036,95

**Tabla 20***Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección media  $h=6.0$  m)*

PROBETA	Longitud	Diámetro externo	Espesor	Área
	Lo (mm)	De (mm)	e (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
DC01M	127,50	127,00	9,08	3362,04
DC02M	116,00	122,50	9,00	3209,14
DC03M	160,00	154,00	7,63	3506,36
DC04M	132,00	151,75	8,00	3612,83
DC05M	150,00	150,00	7,13	3198,09
DC06M	124,50	123,50	8,88	3195,93
DC07M	134,50	124,75	8,38	3061,92
DC08M	157,00	158,75	9,63	4509,22
DC09M	125,00	127,25	9,63	3556,72
DC10M	129,00	126,50	9,63	3534,05
DC11M	132,00	127,25	9,75	3599,09
DC12M	160,00	157,75	10,00	4641,70
DC13M	125,00	127,25	11,00	4017,31
DC14M	152,00	139,25	10,13	4107,29
DC15M	131,00	126,50	10,25	3743,40

**Tabla 21***Dimensionamiento de las probetas de compresión (sección superior  $h=18.0$ )*

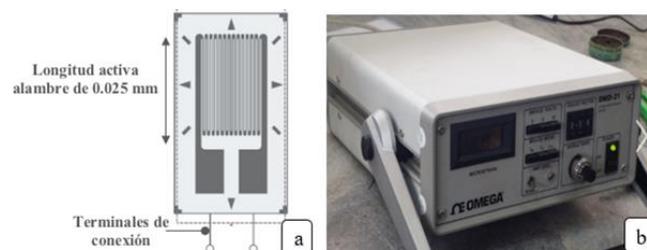
PROBETA	Longitud	Diámetro externo	Espesor	Área
	Lo (mm)	De (mm)	e (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
DC01T	131,50	122,25	5,88	2147,92
DC02T	125,50	129,75	6,38	2470,91
DC03T	124,00	132,25	4,75	1902,63
DC04T	130,50	125,50	5,50	2073,45
DC05T	127,00	120,25	6,75	2406,85
DC06T	100,00	87,00	5,00	1288,05
DC07T	151,50	139,50	7,50	3110,18
DC08T	101,50	88,50	5,38	1403,65
DC09T	135,00	137,25	6,63	2718,70
DC10T	151,00	138,75	7,50	3092,51
DC11T	130,00	136,50	7,00	2847,85
DC12T	151,50	138,25	8,18	3340,65
DC13T	124,50	133,00	7,00	2770,88
DC14T	132,00	136,00	7,00	2836,86
DC15T	132,50	130,50	6,25	2439,64

Cada probeta se preparó según las exigencias de la normativa ISO-22157-1 (2004) sección 9.4, donde indica que previo al ensayo las probetas deben pasar por un control de calidad en el aspecto físico, con el fin de evitar que las fallas visibles alteren los resultados en la experimentación.

Los ensayos del modo mecánico de compresión requieren que las cargas de aplicación sean repartidas uniformemente en los extremos de la probeta. Por lo tanto, fue necesaria la utilización de una máquina de ensayos universales marca AMSLER FM-1033 de 220 V con capacidad de 200 Tn a compresión y 10 Tn a tracción (ver Figura 45), con placas autoajustables que permiten la correcta distribución de la fuerza aplicada. En cuanto a la instrumentación para medir deformaciones fue necesario contar con galgas extensométricas y un puente receptor monocanal DMD-21 (ver Figura 46).



**Figura 45.** Máquina de ensayos universal AMSLER FM-1033



**Figura 46.** Instrumentación para medición de deformaciones (a) galga extensométrica, y (b) puente receptor monocanal DMD-21

**(a) Aditamentos**

Durante el presente ensayo se utilizó pletinas de latón en configuración radial (ver Figura 47) entre las placas circulares (superior e inferior) de la máquina de ensayos y la probeta, para reducir la fricción entre estos elementos.



*Figura 47.* Pletinas de latón en configuración radial

**(b) Strain gauges**

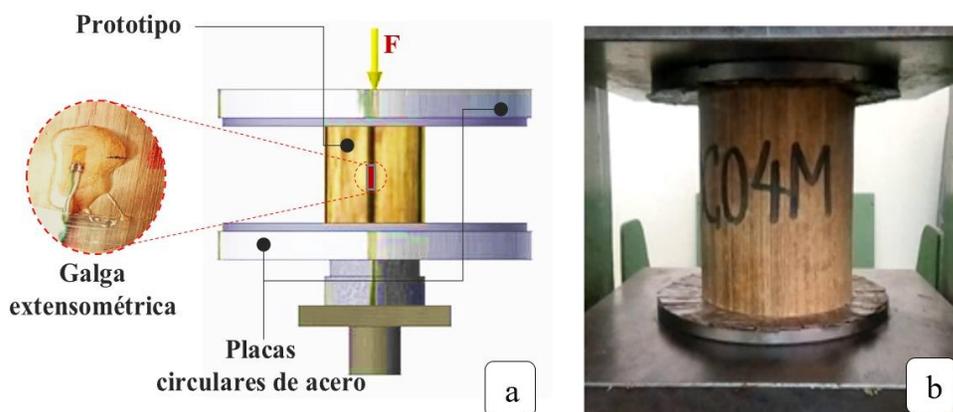
Las galgas extensométricas [strain gauges, ver Figura 46 (a)] son dispositivos extremadamente sensibles, internamente poseen una resistencia eléctrica que se ve alterada proporcionalmente al aplicar una fuerza o peso; al ser adheridas a una superficie sólida, estos elementos pueden captar variaciones de presión, tensión, pares torsores, desplazamientos, vibraciones, fuerzas y deformaciones unitarias, cuyo valor puede visualizarse a través de un puente receptor (Williams, 1987).

Para este ensayo, cada galga extensométrica fue adherida a la probeta libre de defectos, tal como se describe a continuación (i) localizar y marcar el punto de ubicación a media altura de la probeta, (ii) lijar la zona de aplicación, con el fin de mantener una superficie plana y que la medición sea lo más exacta posible, (iii) fijar la

galga extensométrica en el lugar determinado cubriéndola con un adhesivo líquido (resina plástica poliéster de dos componentes), y (iv) conectar las terminales de la galga a un puente receptor monocanal [ver Figura 46 (b)].

#### 4.2.2.2. Protocolo de ensayo

El ensayo inició con la colocación de la probeta entre placas circulares de acero perfectamente alineadas con la celda de carga (ver Figura 48), lo cual aseguró que la aplicación de la carga sea en la dirección longitudinal (L) paralela a las fibras y perpendicular al área de contacto (T-R), a una velocidad de 0,01 mm/s accionada mediante una máquina de ensayos universales (ver Figura 46). Esto garantizó que todos los ensayos se realicen en un lapso de 3 a 5 min, dependiendo de las propiedades físicas de la probeta. Además cabe recalcar que, previo al registro de datos fue necesario aplicar una carga de acoplamiento de 1 kN (ISO-22157-1, 2004). Para cada probeta ensayada se determinó su módulo de elasticidad (MOE) y su correspondiente módulo de ruptura (MOR).



**Figura 48.** Ensayo de compresión paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo

#### 4.2.2.2.1. Módulo de ruptura de compresión

El módulo de ruptura (MOR) para este modo mecánico se define como el máximo valor de esfuerzo de compresión que puede soportar un material antes de fracturarse, siendo a su vez el indicador de la culminación del rango elástico del material (Universidad Centroamericana Jose Simeón Cañas, 2008). Este valor se determinó según la normativa ISO-22157-1 (2004) a través de la Ecuación (3),

$$MOR_i = \frac{F_{max}}{A} \quad (3)$$

donde  $MOR_i$  es el módulo de ruptura de compresión en la dirección  $i$  de la carga en (MPa),  $F_{max}$  es la carga máxima en la cual el espécimen falla en (N), y  $A$  es el área neta de la sección transversal en (mm<sup>2</sup>).

#### 4.2.2.2.2. Módulo de elasticidad de compresión

Este valor representa la rigidez que posee un material, cuya determinación está basada en la ley de Hooke, relacionando las variables esfuerzo-deformación unitaria (Ugural, 2003) a través de la Ecuación (4),

$$\sigma_i = MOE_i * \varepsilon_i \quad (4)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo en (MPa),  $MOE$  es el módulo de elasticidad en (MPa),  $\varepsilon$  es la deformación unitaria en (mm/mm), e  $i$  es la dirección de carga.

Los datos de deformación unitaria generados a través de las galgas extensométricas, así como los valores de esfuerzo de compresión obtenidos en laboratorio permitieron elaborar las gráficas esfuerzo de compresión-deformación

unitaria en las cuales se calculó el valor de la pendiente de la curva en el rango elástico, esto es entre el 10 y el 30% del total de la curva (ISO-22157-1, 2004).

#### 4.2.2.3. Resultados

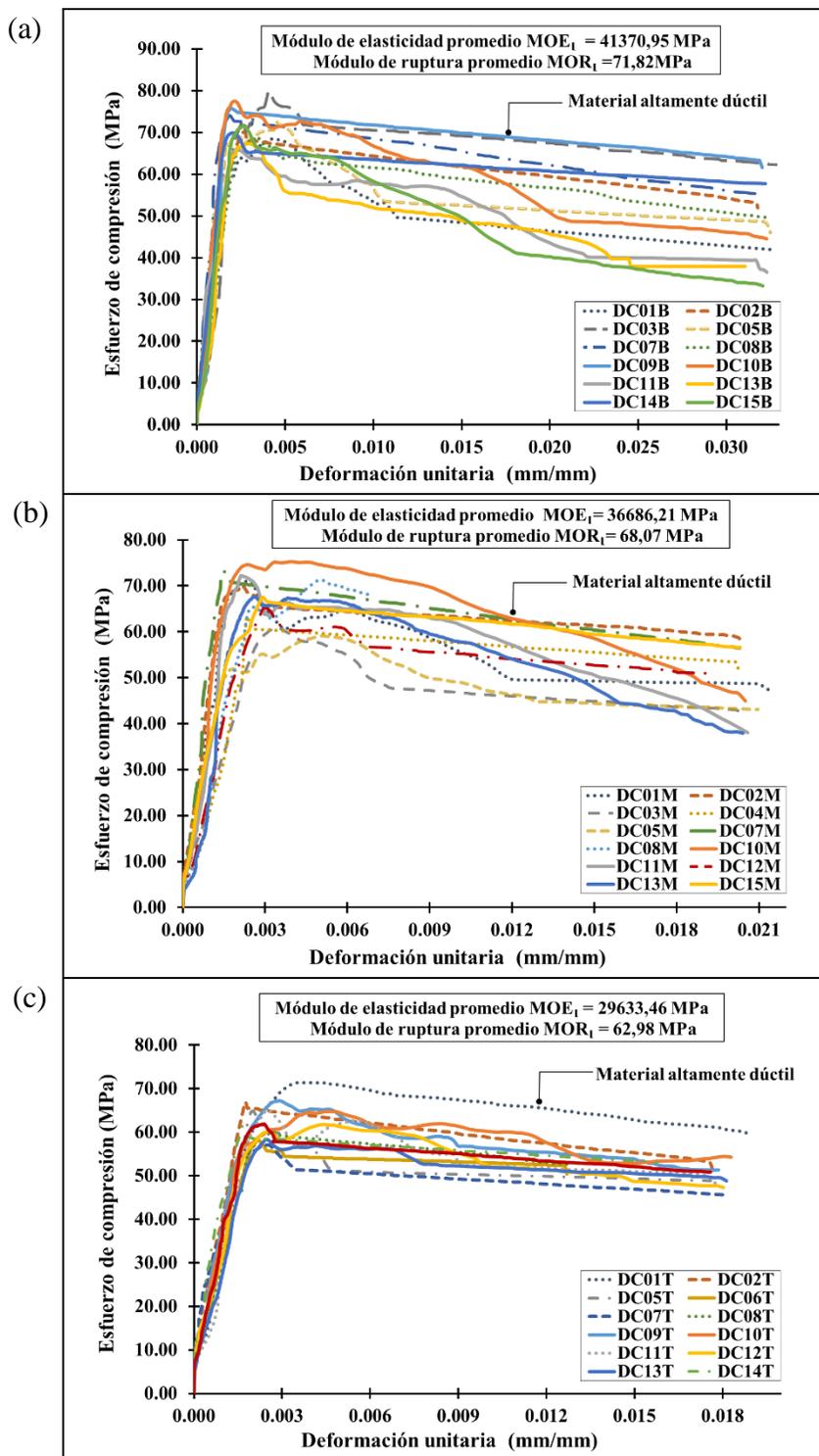
En la Tabla 22 se presentan los resultados promedio para 37 probetas (válidas del total) ensayadas bajo este modo mecánico, en cuanto a módulo de ruptura y módulo de elasticidad analizados en la dirección (L) del culmo, con sus correspondientes valores de densidad básica y contenido de humedad, mismas que fueron extraídas de la sección base, media y superior, respectivamente. El desglose total de resultados de las probetas ensayadas se presenta en el Anexo 3 de la presente investigación.

**Tabla 22**

*Resultados promedios seccionales para el ensayo de compresión en dirección (L) del D. asper*

<b>h (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>N° de probetas</b>	<b><math>\delta_b</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CoV</b>	<b>CH (%)</b>	<b>CoV</b>	<b>MOR<sub>L</sub> (MPa)</b>	<b>CoV</b>	<b>MOE<sub>L</sub> (MPa)</b>	<b>CoV</b>
Base (1.0 m)	IN	12	691,31	0,06	12%	0,03	71,82	0,06	41370,95	0,17
Media (6.0 m)	IN	12	641,22	0,09	12%	0,03	68,07	0,07	36686,21	0,30
Superior (18.0 m)	IN	13	558,81	0,09	11%	0,05	62,98	0,07	29633,46	0,12

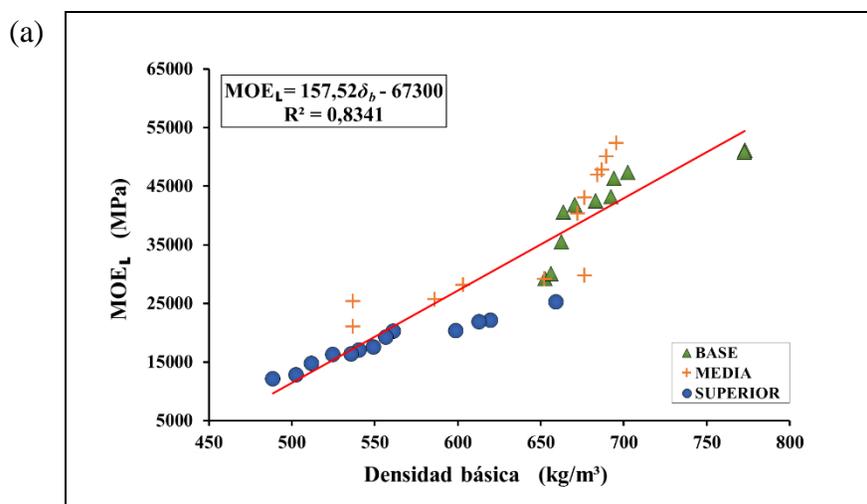
La Figura 49 (a), (b) y (c) muestra los esfuerzos de compresión en dirección (L) versus la deformación unitaria para probetas extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente; con las cuales se determinó sus correspondientes valores promedio de MOE<sub>L</sub> y su MOR<sub>L</sub>.



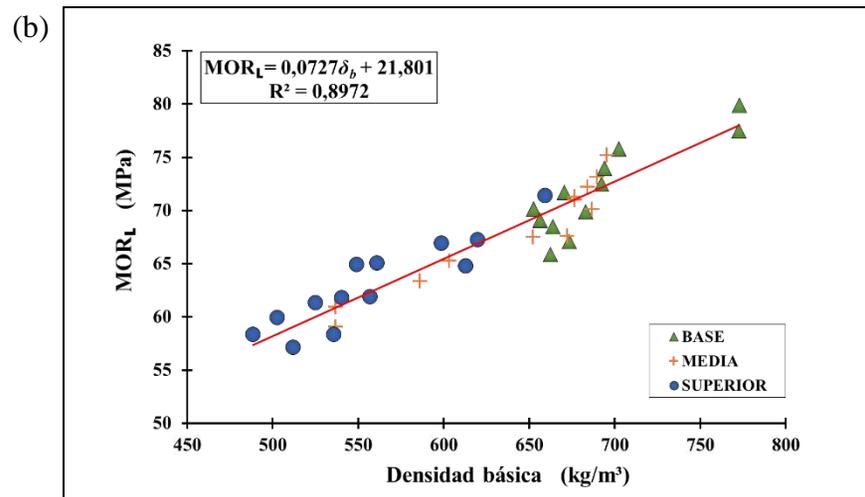
**Figura 49.** Curvas esfuerzo de compresión-deformación unitaria para probetas en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Los resultados mostrados en la Tabla 22 indican que los máximos valores de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  los presenta la sección base del culmo (41370,95 MPa y 71,82 MPa, respectivamente) para una densidad básica promedio de  $691,31 \text{ kg/m}^3$ , asimismo se establece que los resultados son 1,40 y 1,14 veces mayores en magnitud que los correspondientes para la sección superior; lo cual refleja que a mayor altura del culmo existirá mayor flexibilidad, y de la misma forma, mientras menor sea la altura, mayor será la resistencia (Liese, 1992); esta tendencia es producto de la reducción progresiva de la sección del culmo conforme aumenta su altura, presentando en promedio una disminución de hasta 48% entre el área de la sección base y superior.

La Figura 50 (a) y (b) presenta la variación de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  respectivamente, en función de su densidad básica, con sus respectivas ecuaciones de dependencia lineal; estas relaciones demostraron una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,8341$ ) entre sus variables.

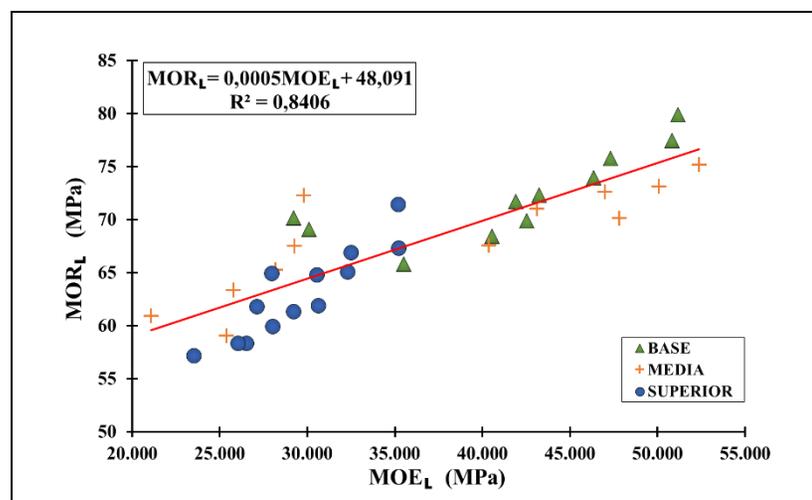


CONTINÚA →



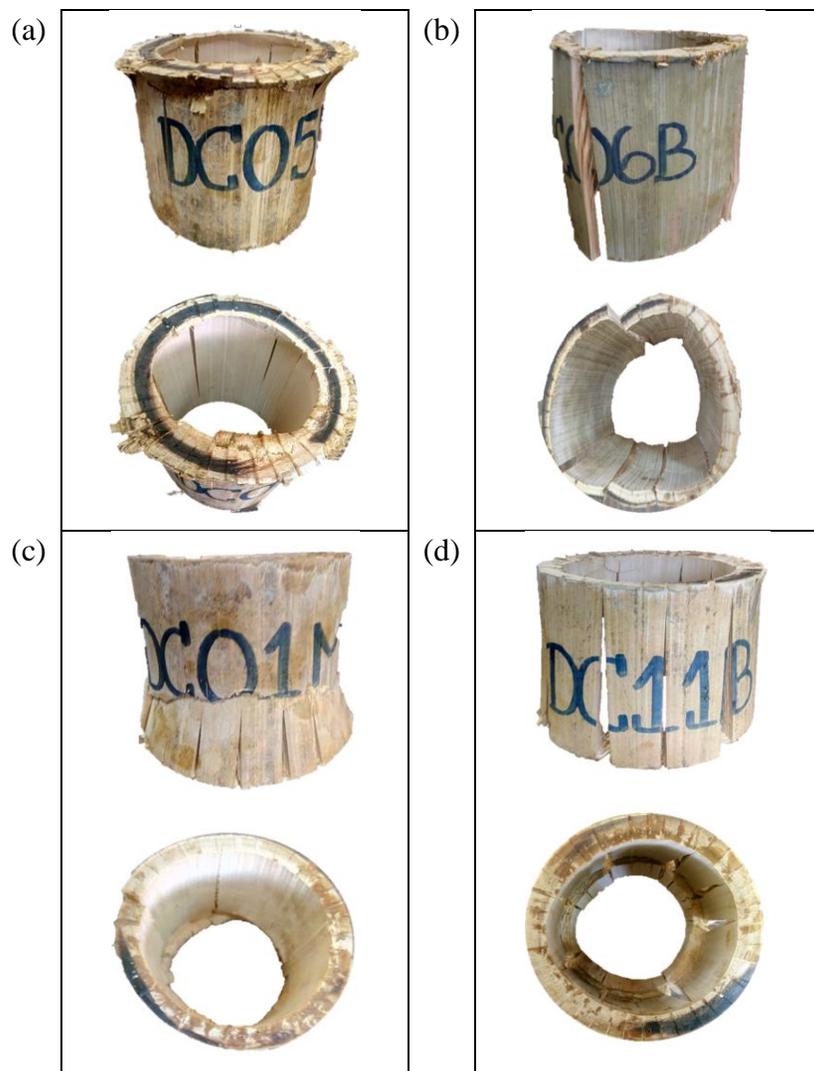
**Figura 50.** Relación de propiedades físico-mecánicas de compresión (a) MOE<sub>L</sub>- densidad básica y (b) MOR<sub>L</sub>- densidad básica

Los resultados de MOE<sub>L</sub> y MOR<sub>L</sub> presentados en la Figura 50 (a) y (b) respectivamente, muestran una relación lineal directamente proporcional en función de su densidad básica, es decir, que a mayor densidad básica mayor será su rigidez y resistencia de compresión. Por lo tanto se demuestra a través de la Figura 51 que ambas propiedades mecánicas también se relacionan lineal y proporcionalmente entre sí, presentando una alta correlación lineal ( $R^2 = 0,8406$ ) entre sus variables.



**Figura 51.** Relación de propiedades mecánicas de compresión MOR<sub>L</sub>- MOE<sub>L</sub>

Basándose en la normativa ISO-22157-1 (2004) y el estudio elaborado por Sánchez Medrano et al. (2016) se identificó los tipos de falla recurrentes presentados en probetas ensayadas bajo el modo mecánico de compresión, los cuales se representan en la Figura 52. El total de probetas ensayadas se muestra en el Anexo 4 de la presente investigación.



**Figura 52.** Tipos de falla en compresión (a) falla por delaminación parcial (DC05M), (b) falla por tensión de las fibras y parénquima (DC06B), (c) falla por delaminación total de las fibras en dirección interna (DC01M), y (d) falla por pandeo general de las fibras en dirección externa (DC11B)

#### 4.2.2.4. Discusión

Con el fin de tener una fuente confiable de comparación se opta por utilizar únicamente los resultados de la sección media del culmo, debido a que ésta es la sección común de análisis en todos los estudios relacionados (ver Tabla 5).

En comparación con los resultados obtenidos en esta investigación (ver Tabla 22), Ghavami & Marinhno (2001) y Carranza Armendáriz F. & Taco Álvarez J. (2011) reportan valores promedio de  $MOE_L$  1,75 y 1,17 veces menores en magnitud, respectivamente; por otra parte el resultado presentado por Bounsong Sompoh et al. (2013) es 1,50 veces mayor, esta variación de resultados es producto de la influencia de los factores de sitio, edad del culmo y su contenido de humedad al momento de realizar el ensayo (referirse a las secciones 2.5 y 3.1).

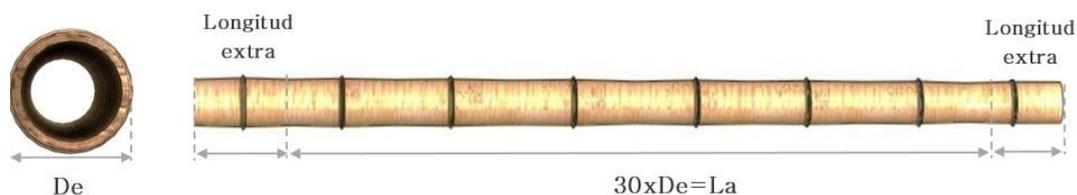
En cuanto a  $MOR_L$ , Bounsong Sompoh et al. (2013), Surjokusumo y Nugroho (1995), Awalluddin et al. (2017) y Ghavami & Marinhno (2001) reportan valores promedio cuya variación no excede de 1,16 veces el resultado nominal de este estudio, esto se debe a que (i) las zonas de extracción de los culmos presentan una precipitación anual promedio de 2200 mm, la cual es similar en magnitud a los 2150 mm de la ciudad de Quevedo, Ecuador (Climate-Data, 2015) y (ii) el contenido de humedad de las probetas ensayadas en estas investigaciones estuvo en el rango de 12 a 15%.

### 4.2.3. Flexión perpendicular a la fibra

El ensayo a flexión se produce cuando un cuerpo de gran longitud con respecto a su sección transversal es sometido a una acción de carga perpendicular, en el caso de tener una sección tubular la carga actúa en la dirección radial (R), generando un momento alrededor del eje tangencial (T) que consecuentemente provoca un arqueamiento físico sobre el elemento analizado (Diaz Mendez y Vasquez Sandoval, 2005).

#### 4.2.3.1. Selección y preparación del material

El número de probetas utilizadas para este ensayo se redujo en un 70% por motivos dimensionales y de disponibilidad física en el laboratorio, adicionalmente el recurso que implica la curación de las probetas (corte, transporte, preservación y secado) demanda factores económicos elevados. Un total de 15 probetas fueron extraídas equitativamente bajo este modo mecánico de la sección basal (5), media (5) y superior (5) del culmo tratado (la edad estimada varía entre 4 y 5 años), siguiendo los lineamientos de la normativa ISO-22157-1 (2004) literal 10, donde se especifica que las probetas de ensayo deben tener una longitud ( $L_a$ ) igual a 30 veces el diámetro externo ( $D_e$ ) para el vano central más una longitud extra (un entrenudo como mínimo) para los apoyos (ver Figura 53), asegurando así un dominio de flexión pura lo cual minimiza los efectos de corte y compresión paralela.



**Figura 53.** Dimensiones nominales de las probetas para ensayo de flexión

Las Tablas 23, 24 y 25 presentan las propiedades geométricas de cada probeta a evaluar, especificando su longitud total, el diámetro promedio (tomado de los 4 puntos de ensayo) y el espesor promedio (tomado de los extremos de la probeta); éstas fueron extraídas a alturas nominales de 1.5 m (sección base), 6 m (sección media) y 18 m (sección superior), obteniendo así un mapeo del tejido estructural completo de la especie.

**Tabla 23**

*Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección base  $h=1.5$ )*

PROBETA	Vano libre	Diámetro promedio	Espesor promedio
	La (mm)	De prom. (mm)	e prom. (mm)
DF01B	4655,00	152,11	16,38
DF02B	4570,00	160,02	13,75
DF03B	4610,00	155,20	15,25
DF04B	4615,00	165,20	17,00
DF05B	4625,00	158,00	16,90

**Tabla 24**

*Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección media  $h=6.0$ )*

PROBETA	Vano libre	Diámetro promedio	Espesor promedio
	La (mm)	De prom. (mm)	e prom. (mm)
DF01M	42220,00	143,28	13,25
DF02M	4645,00	129,37	11,88
DF03M	4660,00	129,42	16,13
DF04M	4625,00	130,45	15,00
DF05M	4645,00	142,36	11,20

**Tabla 25**

*Dimensionamiento de las probetas de flexión (sección superior  $h=18.0$ )*

PROBETA	Vano libre	Diámetro promedio	Espesor promedio
	La (mm)	De prom. (mm)	e prom. (mm)
DF01T	4655,00	113,68	11,88
DF02T	4645,00	109,41	12,88
DF03T	4375,00	90,04	9,63
DF04T	4655,00	76,21	9,25
DF05T	4635,00	95,30	9,62

Los ensayos del modo mecánico de flexión se realizaron en un vibroforo de baja frecuencia marca AMSLER-417U de 220 V con capacidad de 100 Tn (ver Figura 54), perteneciente al Laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Este instrumento permitió simular el ensayo mecánico en curso ya que cuenta con un software incluido que registra, procesa y grafica los valores de la fuerza externa actuante y la deformación causada en el material. Para medir este último parámetro el equipo cuenta con un deformímetro digital en su configuración.



**Figura 54.** Vibroforo de baja frecuencia AMSLER-417 U con capacidad de 100 Tn

#### **(a) Aditamentos**

Las probetas de este ensayo utilizaron 3 aditamentos (i) una viga distribuidora de carga [ver Figura 55 (a)], la cual dividirá uniformemente la fuerza aplicada por la máquina, (ii) dos monturas de carga que transmiten la fuerza para deformar al culmo de bambú, y (iii) dos monturas de apoyo, las cuales permiten la rotación libre del culmo [ver Figura 55 (b)], como lo indica la normativa ISO-22157-1 (2004) sección 10.3.2.

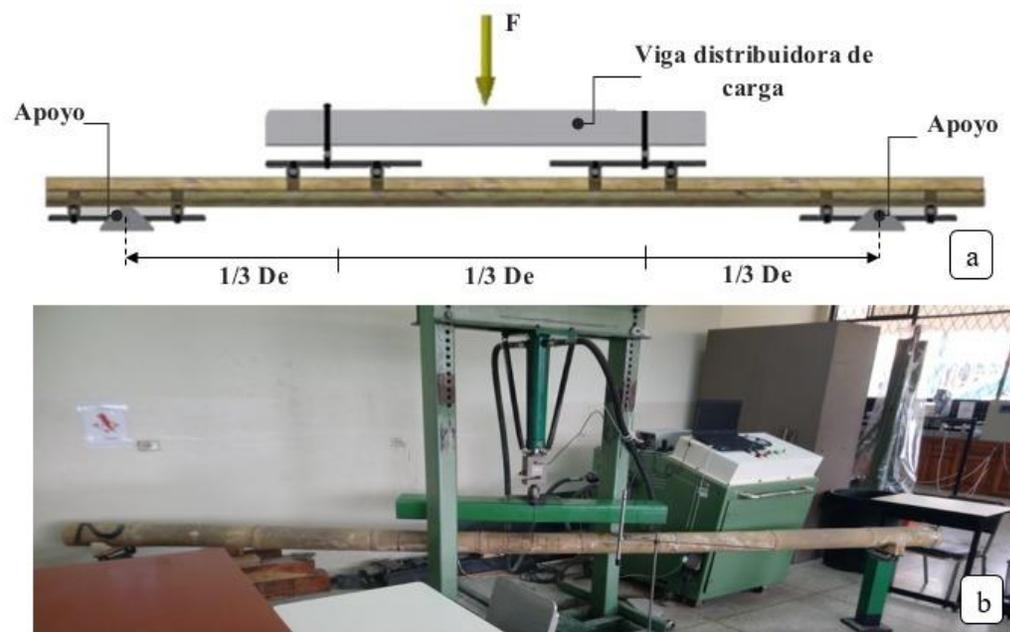


**Figura 55.** Aditamentos implementados en el ensayo de flexión (a) viga distribuidora de carga, y (b) monturas de carga y de apoyo

#### 4.2.3.2. Protocolo de ensayo

El ensayo de flexión se ejecutó mediante un modelo de 4 puntos, puesto que, la zona central del culmo, estructuralmente más eficiente, es aquella con un momento flector uniforme superficialmente más amplio, singularidad que no sucede con un elemento sometido a un solo punto de carga central (Gere y Timoshenko, 2009). El ensayo inició apoyando la probeta en dos soportes extremos (monturas de apoyo) que permitieron estabilizarla, posteriormente se ancló las monturas de carga a la viga distribuidora en la parte superior de la probeta a  $1/3$  y  $2/3$  de distancia (ver Figura 56), asegurando que la aplicación de carga sea en la dirección radial (R) perpendicular a las fibras del bambú a una velocidad progresiva de  $0,5 \text{ mm/s}$  accionada por un vibroforo de baja frecuencia (ver Figura 54), finalmente se colocó el deformímetro digital en el eje central de la viga. Esto garantizó que todos los ensayos se realicen en un lapso de 6 a 8 min. Cabe recalcar que, previo al registro de datos se alineó y niveló todo el sistema de ensayo sin generar alteraciones mecánicas en la probeta, por ejemplo: cargas

previas o rigidez adicional, provocadas por el asentamiento total de la viga sobre la probeta (ISO-22157-1, 2004). Para cada probeta ensayada se determinó su módulo de elasticidad (MOE) y su correspondiente módulo de ruptura (MOR).



**Figura 56.** Ensayo de flexión perpendicular a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo

#### 4.2.3.2.1. Módulo de ruptura de flexión

El módulo de ruptura para este modo mecánico se define como el esfuerzo máximo de flexión que puede soportar un material antes del colapso. Este valor se determinó mediante la normativa ISO-22157-1 (2004) a partir de las Ecuaciones (5) y (6),

$$I_B = \frac{\pi}{64} * [De^4 - (De - 2e)^4] \quad (5)$$

$$MOR_i = \frac{F_{max} * La * De}{12 * I_B} \quad (6)$$

donde  $I_B$  es el momento de inercia en ( $\text{mm}^4$ ),  $De$  es el diámetro externo en (mm),  $e$  es el espesor del culmo en cada sección transversal medida en (mm),  $MOR_i$  es el módulo de ruptura de flexión en la dirección  $i$  de carga en (MPa),  $F_{max}$  es la carga máxima aplicada en (N),  $La$  es la longitud del vano libre en (mm), y  $\Delta$  es la deflexión máxima en el punto medio del vano en (mm).

#### 4.2.3.2.2. Módulo de elasticidad de flexión

El módulo de elasticidad de flexión se calculó mediante la Ecuación (7), a partir de la deflexión máxima en el vano central ( $\Delta$ ) y los factores anteriormente mencionados en el cálculo del MOR. En este ensayo los valores calculados son teóricos, ya que los cálculos no toman en cuenta las variaciones seccionales reales bambú; a pesar de esto, los resultados obtenidos pueden ser utilizados directamente en el diseño completo del culmo de bambú.

$$MOE_i = \frac{23 * F_{max} * La^3}{1296 * \Delta * I_B} \quad (7)$$

donde  $MOE_i$  es el módulo de elasticidad a flexión en la dirección  $i$  de carga en (MPa),  $F_{max}$  es la carga máxima aplicada en (N),  $La$  es la longitud del vano libre en (mm),  $\Delta$  es la deflexión máxima en el punto medio del vano en (mm), e  $I_B$  es el momento de inercia en ( $\text{mm}^4$ ).

#### 4.2.3.3. Resultados

En la Tabla 26 se presentan los resultados promedio para 10 probetas (válidas del total) ensayadas bajo este modo mecánico, en cuanto a módulo de ruptura y módulo de elasticidad analizados en la dirección radial (R) del culmo, con sus correspondientes

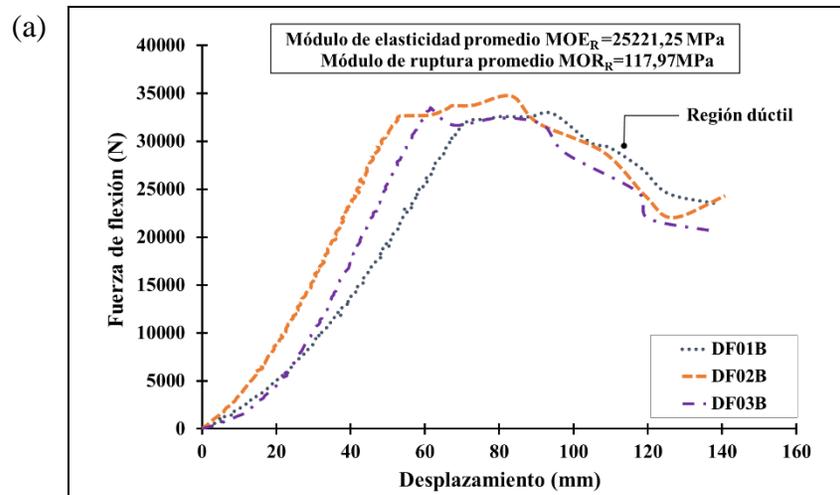
valores de densidad básica y contenido de humedad, mismas que fueron extraídas de la sección base, media y superior, respectivamente. El desglose total de resultados de las probetas ensayadas se presenta en el Anexo 5 de la presente investigación.

**Tabla 26**

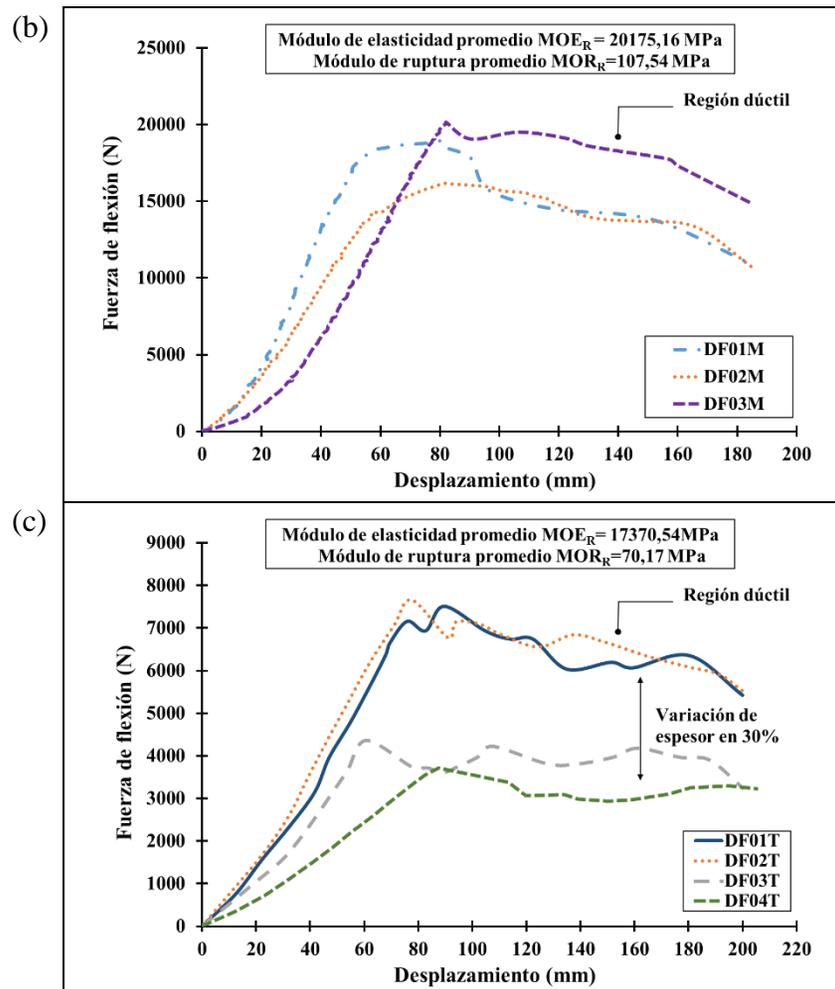
*Resultados promedios seccionales para el ensayo de flexión en dirección (R) del D. asper*

h (m)	Tipo	N° de probetas	$\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	CoV	CH (%)	CoV	MOR <sub>R</sub> (MPa)	CoV	MOE <sub>R</sub> (MPa)	CoV
Base (1.5 m)	IN-N	4	820,70	0,00	17%	0,09	117,97	0,03	25221,25	0,07
Media (6.0 m)	IN-N	3	686,04	0,01	17%	0,10	107,54	0,02	20175,76	0,07
Superior (18.0 m)	IN-N	3	605,07	0,01	16%	0,18	70,17	0,04	17370,54	0,06

La Figura 57 (a), (b) y (c) muestra las fuerzas de flexión en dirección (R) versus el desplazamiento para probetas extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente; con las cuales se determinó sus correspondientes valores promedio de MOE<sub>R</sub> y su MOR<sub>R</sub>.



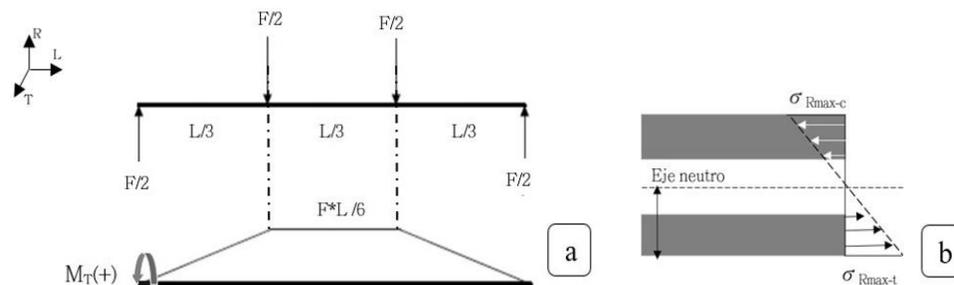
CONTINUÍA →



**Figura 57.** Curvas fuerza de flexión-desplazamiento para probetas en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Los resultados mostrados en la Tabla 26 indican que los máximos valores de  $MOE_R$  y  $MOR_R$  los presenta la sección base del culmo (25221,25 MPa y 117,82 MPa, respectivamente) para una densidad básica promedio de  $820,70 \text{ kg/m}^3$ , asimismo se establece que los resultados son 1,45 y 1,68 veces mayores en magnitud que los correspondientes para la sección superior. Hull (1987) explica que esta amplia diferencia entre los resultados analizados para las secciones base y superior se debe a

que el momento flector máximo de una viga tubular simplemente apoyada [ver Figura 58 (a)] induce esfuerzos de flexión proporcionales a la carga [ver Figura 58 (b)].



**Figura 58.** Principios básicos de resistencia de materiales (a) esquema del momento flector máximo en una viga simplemente apoyada con dos puntos de carga, y (b) esquema de los esfuerzos de flexión producidos en un culmo de bambú

En consecuencia, se obtiene valores teóricos de MOE y MOR influenciados enteramente por las características morfológicas del espécimen (longitud, diámetro y espesor), tal como se puede apreciar en las Ecuaciones (8)-(9), determinadas en base al equilibrio de momentos y el análisis de esfuerzo correspondiente (Bonilla Jiménez et al., 2017).

$$M_L = \frac{F_{m\acute{a}x} * La}{6} \quad (8)$$

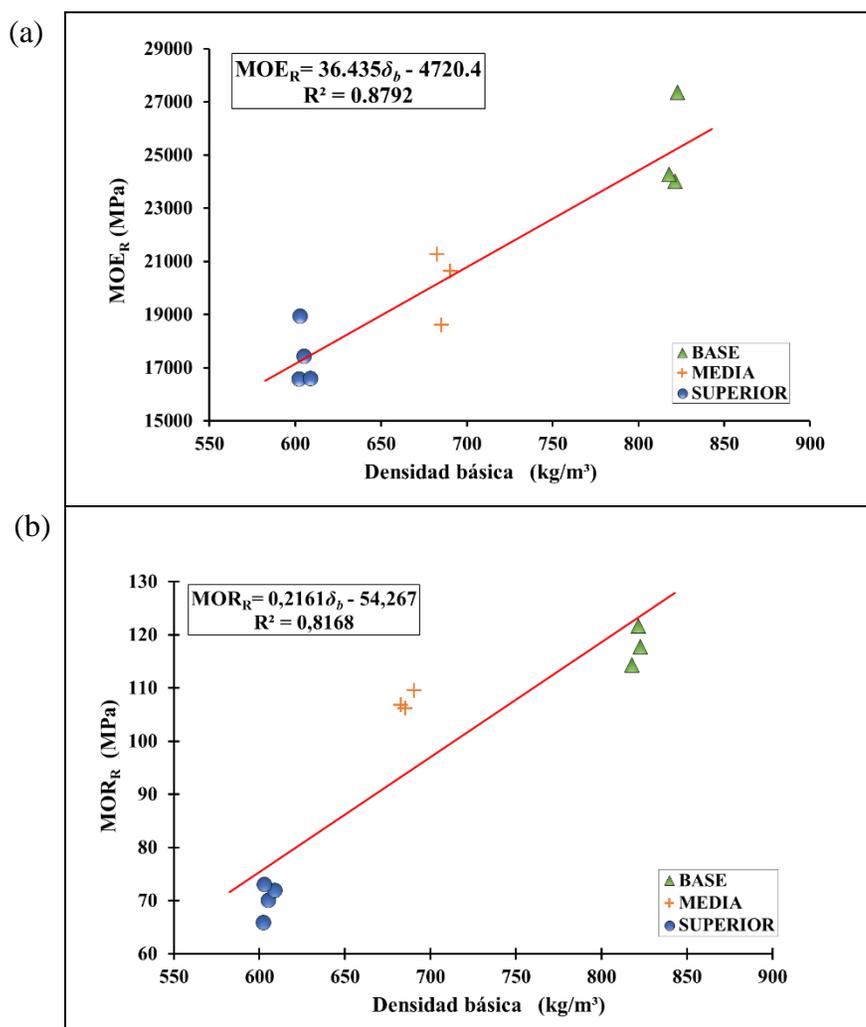
$$\sigma_R = \frac{M_L * r}{I_B} \quad (9)$$

donde  $M_L$  es el momento flector máximo en (N-mm),  $F_{max}$  es la carga máxima aplicada en (N),  $La$  es la longitud del vano libre en (mm),  $\sigma_R$  es el esfuerzo de flexión en (MPa),  $r$  es el radio del culmo en (mm) e  $I_B$  es el momento de inercia en (mm<sup>4</sup>).

Sustituyendo la Ecuación (8) en la Ecuación (9) y colocando el valor del radio en función del diámetro se obtiene la Ecuación (6) para el MOR de este modo mecánico; de igual manera la ecuación gobernante para el MOE [ver Ecuación (7)] es

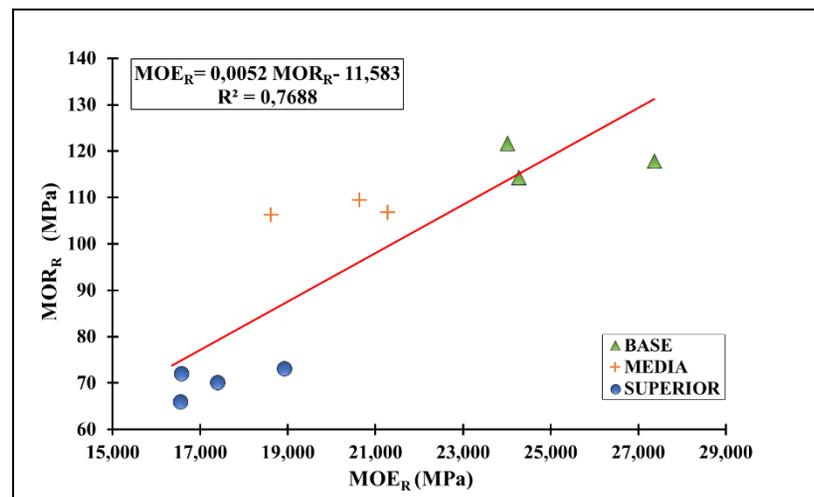
el resultado de la relación inversamente proporcional entre la deflexión generada y el módulo de elasticidad en este tipo de viga [ver Figura 58 (a)].

La Figura 59 (a) y (b) presenta la variación de  $MOE_R$  y  $MOR_R$  respectivamente, en función de su densidad básica, con sus respectivas ecuaciones de dependencia lineal; estas relaciones demostraron una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,8168$ ) entre sus variables.



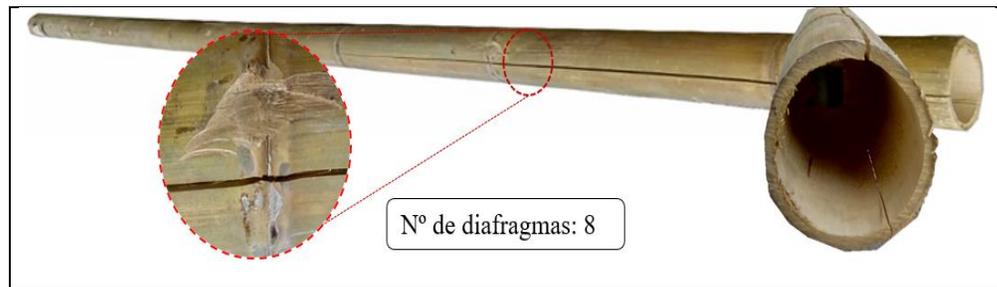
**Figura 59.** Relación de propiedades físico-mecánicas de flexión  
(a)  $MOE_R$ - densidad básica y (b)  $MOR_R$ - densidad básica

Los resultados de  $MOE_R$  y  $MOR_R$  presentados en la Figura 59 (a) y (b) respectivamente, muestran una relación lineal directamente proporcional en función de su densidad básica, es decir, que a mayor densidad básica mayor será su rigidez y resistencia de flexión. Por lo tanto se demuestra a través de la Figura 60 que ambas propiedades mecánicas también se relacionan lineal y proporcionalmente entre sí, presentando una alta correlación lineal ( $R^2 = 0,7688$ ) entre sus variables.



**Figura 60.** Relación de propiedades mecánicas de flexión  $MOR_R$ -  $MOE_R$

Basándose en la normativa ISO-22157-1 (2004) y el estudio elaborado por Sánchez Medrano et al. (2016) se identificó un tipo de falla recurrente (Figura 61) presentado en todas las probetas ensayadas bajo el modo mecánico de flexión. El total de probetas ensayadas se muestra en el Anexo 6 del documento.



**Figura 61.** Fractura lineal por fatiga uniforme y desgarramiento fibrovascular presentado en la probeta DF02M

#### 4.2.3.4. Discusión

Con el fin de tener una fuente confiable de comparación se opta por utilizar únicamente los resultados de la sección media del culmo, debido a que ésta es la sección común de análisis en todos los estudios relacionados (ver Tabla 6).

En comparación con los resultados obtenidos en esta investigación (ver Tabla 26), Amatos A.T. & Loretero M.E. (2016) reporta un valor de  $MOE_R$  1,30 veces mayor en magnitud a razón de que las probetas de éste fueron curadas mediante un tratamiento en sal y analizadas con la configuración de ensayo en 3 puntos; mientras que Naik (2004), Surjokusumo y Nugroho (1995) y Carranza Armendáriz F. & Taco Álvarez J. (2011) presentan valores promedio cuya variación no excede 1,23 veces al resultado nominal de este estudio debido a que las zonas de extracción de los culmos presentan una precipitación anual promedio de 1993 mm la cual es similar en magnitud a los 2150 mm de la ciudad de Quevedo, Ecuador (Climate-Data, 2015), además la edad de los culmos es la misma que la utilizada por los autores, es decir, mayor a 4 años.

En cuanto a  $MOR_R$ , Surjokusumo y Nugroho (1995) presentan un valor en el mismo orden de magnitud que esta investigación (1,25 veces mayor) por causa de su similitud en sus contenidos de humedad promedio (16 y 17%). Por otro lado, Amatoso A.T. & Loretero M.E. (2016) y Naik (2004) reportan valores promedios de 1,97 y 1,79 veces mayor, respectivamente; esto debido a que el contenido de humedad de las probetas ensayadas en estas investigaciones estuvo en un rango no mayor a 8%, concluyendo que a medida que se pierde humedad la resistencia máxima del material aumenta.

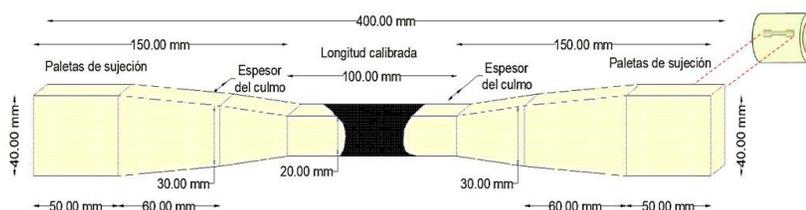
#### **4.2.4. Tracción paralela a la fibra**

Se procede a la determinación de la resistencia a la tracción paralela a la fibra mediante la aplicación de dos fuerzas axiales que actúan en sentido opuesto, mismas que aumentan gradualmente sobre la pieza de ensayo intentando alargar su estructura hasta alcanzar el esfuerzo máximo interno de acuerdo a la composición del material (Gere y Timoshenko, 2009).

##### **4.2.4.1. Selección y preparación del material**

Un total de 45 probetas fueron extraídas para el modo mecánico de tracción, las cuales se distribuyeron equitativamente en la sección basal (15), media (15) y superior (15) del culmo tratado (la edad estimada varía entre 5 y 6 años), basándose en los lineamientos de la normativa ISO-22157-1 (2004) literal 12, donde se especifica los rangos dimensionales a los que deberán acoplarse las probetas destinadas a tracción, éstas tendrán una longitud calibrada de 50 a 100 mm y un espesor de 10 a 20 mm valores que dependerán del libre criterio de los autores de investigación; de igual

manera la conformación de las paletas de sujeción se realizarán en función de los equipos a utilizar, esta geometría se la conoce como “configuración dog-bone” la cual garantiza que el fallo mecánico se efectúe en la zona establecida por la norma y a su vez disminuya la concentración de esfuerzos en las zonas de transición de tensión externa. La Figura 62 presenta la geometría de las probetas para tracción adoptada en esta investigación.



**Figura 62.** Dimensiones nominales de las probetas para ensayo mecánico a tracción

Es importante mencionar que la norma ISO-22157-1 (2004) establece que el ensayo de tracción se lo realizará en probetas nodales, sin embargo, se ha planteado la utilización de un porcentaje (30%) de probetas internodales con el propósito de discretizar resultados y obtener una base evaluativa-comparativa en futuras investigaciones.

Las Tablas 27, 28 y 29 presentan las propiedades geométricas de cada probeta ensayada, especificando 3 medidas transversales y 3 espesores con sus respectivos promedios, mismas que fueron obtenidas en 3 fracciones de la longitud calibrada (2 en los extremos y 1 en el medio), con dichos valores se procedió a calcular la sección de análisis que proporcionará los resultados de resistencia a la tensión en el área de la longitud calibrada.

**Tabla 27***Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección base  $h=1.5$  m)*

Longitud Total	400 mm				Longitud calibrada	100 mm			
PROBETA	Dimensión transversal				Espesor				Área
	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	w prom. (mm)	e1 (mm)	e2 (mm)	e3 (mm)	e prom. (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Nodales</b>									
DT01BN	20,84	20,27	21,11	20,74	14,72	19,58	12,93	15,74	326,52
DT02BN	23,97	21,37	22,14	22,49	15,97	19,30	14,19	16,49	370,84
DT03BN	22,83	20,90	22,50	22,08	12,80	14,16	10,90	12,62	278,61
DT04BN	21,22	19,26	22,25	20,91	14,29	17,10	12,41	14,60	305,29
DT05BN	21,85	20,79	22,86	21,83	12,79	18,27	14,37	15,14	330,63
DT06BN	20,95	19,90	22,18	21,01	11,97	15,08	14,00	13,68	287,49
DT07BN	22,15	21,71	22,25	22,04	17,96	19,79	17,69	18,48	407,24
DT08BN	20,58	19,26	22,25	20,70	14,29	17,10	12,41	14,60	302,17
DT09BN	20,75	20,28	21,52	20,85	14,85	19,25	15,32	16,47	343,47
DT10BN	21,52	19,53	22,10	21,05	11,52	15,20	14,23	13,65	287,33
<b>Probetas Internodales</b>									
DT01B	22,47	21,00	22,58	22,02	9,50	9,72	9,98	9,73	214,30
DT02B	22,16	21,07	21,41	21,55	10,69	10,50	10,49	10,56	227,53
DT03B	24,14	22,68	22,02	22,95	9,69	9,93	9,92	9,85	225,95
DT04B	22,26	21,10	21,78	21,71	10,14	10,26	10,34	10,25	222,49
DT05B	22,15	21,00	22,05	21,73	9,45	9,50	9,65	9,53	207,19

**Tabla 28***Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección media  $h=6.0$  m)*

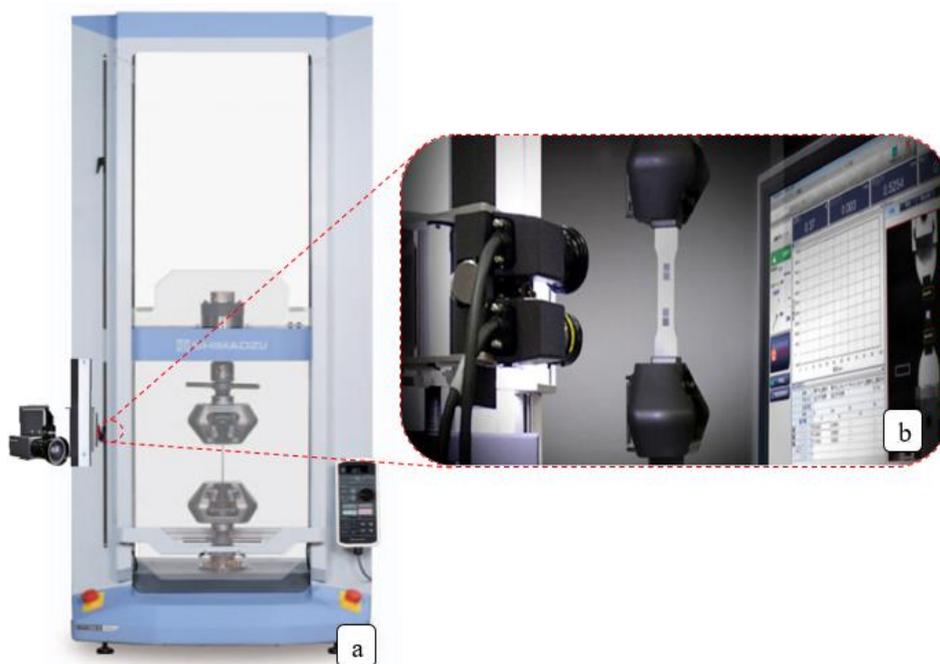
Longitud Total	400 mm				Longitud calibrada	100 mm			
PROBETA	Dimensión transversal				Espesor				Área
	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	w prom. (mm)	e1 (mm)	e2 (mm)	e3 (mm)	e prom. (mm)	A (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Nodales</b>									
DT01MN	21,46	20,78	21,99	21,41	8,58	13,64	9,98	10,73	229,80
DT02MN	22,57	21,68	22,83	22,36	8,65	12,08	10,35	10,36	231,65
DT03MN	23,12	21,01	22,28	22,14	11,44	13,75	9,60	11,60	256,71
DT04MN	22,24	20,33	21,97	21,51	10,40	12,82	9,07	10,76	231,56
DT05MN	23,15	20,83	21,68	21,89	11,45	16,18	9,94	12,52	274,09
DT06MN	22,33	21,58	23,85	22,59	8,36	13,03	9,55	10,31	232,94
DT07MN	21,80	21,88	23,53	22,40	9,91	13,18	8,45	10,51	235,53
DT08MN	22,86	21,74	22,54	22,38	9,30	13,64	10,34	11,09	248,27
DT09MN	22,14	20,35	20,88	21,12	10,54	13,88	9,07	11,16	235,81
DT10MN	21,3	20,9	22,91	21,70	10,03	12,06	8,94	10,34	224,48
<b>Probetas Internodales</b>									
DT01M	21,93	20,04	21,92	21,30	10,22	10,19	10,46	10,29	219,14
DT02M	22,60	21,01	23,11	22,24	10,52	10,25	10,06	10,28	228,55
DT03M	22,20	20,30	22,37	21,62	9,71	9,22	9,42	9,45	204,34
DT04M	22,10	21,36	22,88	22,11	10,48	10,27	10,08	10,28	227,25
DT05M	23,09	20,66	23,12	22,29	10,33	10,48	10,71	10,51	234,19

**Tabla 29***Dimensionamiento de las probetas de tracción (sección superior  $h=18.0$  m)*

<b>Longitud Total</b>	400 mm				<b>Longitud calibrada</b>	100 mm			
<b>PROBETA</b>	<b>Dimensión transversal</b>				<b>Espesor</b>				<b>Área</b>
	<b>w<sub>1</sub></b> (mm)	<b>w<sub>2</sub></b> (mm)	<b>w<sub>3</sub></b> (mm)	<b>w<sub>prom.</sub></b> (mm)	<b>e<sub>1</sub></b> (mm)	<b>e<sub>2</sub></b> (mm)	<b>e<sub>3</sub></b> (mm)	<b>e<sub>prom.</sub></b> (mm)	<b>A</b> (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Nodales</b>									
<b>DT01TN</b>	23,18	21,56	24,15	22,96	8,04	12,84	7,03	9,30	213,64
<b>DT02TN</b>	23,12	21,65	24,79	23,19	7,71	13,78	9,07	10,19	236,19
<b>DT03TN</b>	23,72	20,42	22,60	22,25	9,76	13,35	7,97	10,36	230,48
<b>DT04TN</b>	23,50	21,85	22,77	22,71	10,12	12,92	8,16	10,40	236,15
<b>DT05TN</b>	24,15	21,97	23,38	23,17	6,71	12,81	7,56	9,03	209,12
<b>DT06TN</b>	23,61	22,44	24,13	23,39	6,65	12,50	7,53	8,89	208,04
<b>DT07TN</b>	22,65	20,92	23,10	22,22	6,93	13,80	8,43	9,72	216,01
<b>DT08TN</b>	22,50	21,24	22,45	22,06	8,33	13,15	7,03	9,50	209,68
<b>DT09TN</b>	23,03	21,63	23,48	22,71	8,20	13,02	9,40	10,21	231,83
<b>DT10TN</b>	23,11	23	24,08	23,40	7,42	14,24	8,86	10,17	238,02
<b>Probetas Internodales</b>									
<b>DT01T</b>	23,01	21,57	23,01	22,53	7,24	6,91	6,62	6,92	155,98
<b>DT02T</b>	22,65	20,74	22,73	22,04	9,44	9,51	9,11	9,35	206,15
<b>DT03T</b>	23,42	22,37	24,10	23,30	6,84	6,81	6,85	6,83	159,19
<b>DT04T</b>	23,34	21,96	23,65	22,98	6,32	6,31	6,49	6,37	146,48
<b>DT05T</b>	23,13	21,61	23,37	22,70	10,13	10,28	10,43	10,28	233,39

La preparación del material previo al ensayo, se estableció de acuerdo a las exigencias de la normativa ISO-22157-1 (2004) sección 12.4, donde establece que la longitud calibrada de las probetas debe ser paralelo a la dirección de las fibras del bambú. Adicionalmente se debe mantener un control de ensayo similar al realizado en compresión (ver numeral 4.2.2.1).

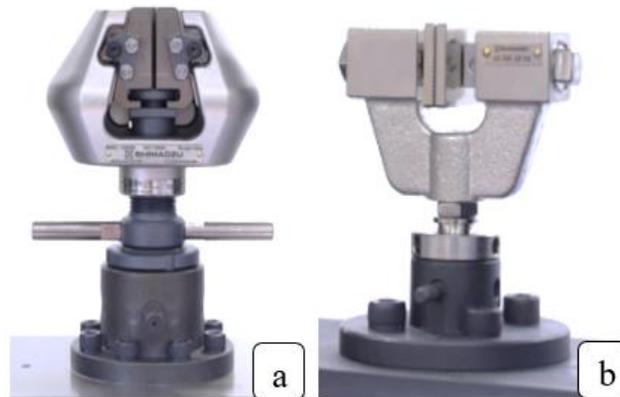
Para este ensayo mecánico fue utilizada una máquina de ensayos universales marca Shimadzu AGS-X de 300 kN de capacidad equipada con un video extensómetro de cámara dual y una plataforma receptora de datos Trapezium X, esta instrumentación permitió visualizar y registrar las cargas de aplicación exactas con una distribución uniforme en los extremos de la probeta (ver Figura 63).



**Figura 63.** Instrumental utilizado durante el ensayo de tracción (a) máquina de ensayos universales Shimadzu AGS-X de 300 kN, y (b) video extensómetro con cámara dual y plataforma Trapezium X

#### **(a) Aditamentos**

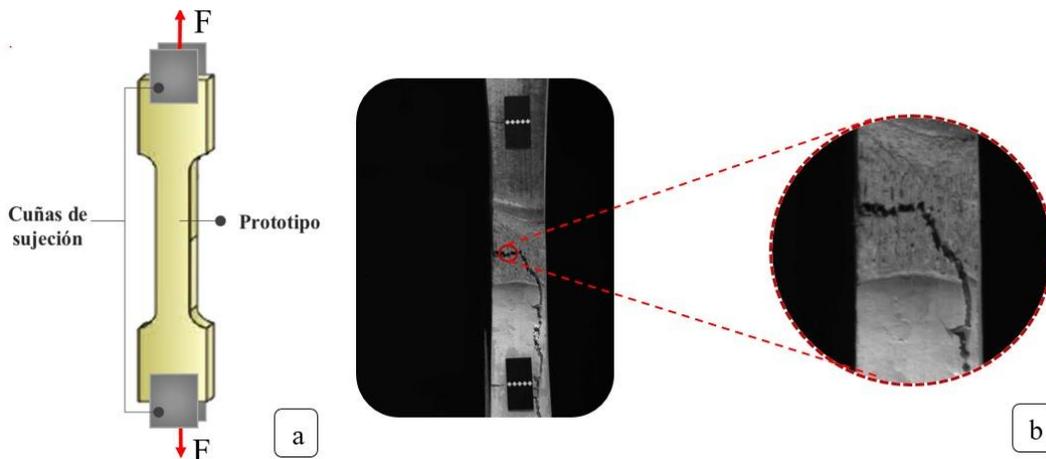
En el presente ensayo se utilizó agarraderas de cuñas no desplazables (con capacidad de 100 kN) o llaves en “T” de cuñas planas (con capacidad de 50 kN); cada uno de estos acoples será adaptado a la máquina de ensayos universales según el espesor de la probeta, ya que las cuñas tienen un límite dimensional de expansión marcado (ver Figura 64).



**Figura 64.** Aditamentos implementados en el ensayo de tracción (a) agarraderas de cuñas no desplazables, y (b) llave en “T” de cuñas planas

#### 4.2.4.2. Protocolo de ensayo

El ensayo inició con la colocación de la probeta entre las cuñas de sujeción de la máquina de ensayos universales (ver Figura 63) las mismas que aplicarán una fuerza de tracción en dirección longitudinal (L) paralela a las fibras (ver Figura 65); se configuró la máquina para que se aplique una carga a una velocidad de 0,5 mm/min. Esto garantizó que todos los ensayos se realicen en un lapso de 8 a 12 min, dependiendo de las propiedades físicas de la probeta. La normativa ISO-22157-1 (2004), recomienda desechar los resultados de las probetas cuya fractura no se produzca en la longitud calibrada. Los datos registrados en este ensayo fueron de desplazamiento del cabezal de la máquina y la fuerza aplicada, posteriormente se determinó para cada probeta ensayada su módulo de elasticidad (MOE) y su correspondiente módulo de ruptura (MOR).



**Figura 65.** Ensayo de tracción paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) acercamiento de la región de falla mediante el video extensómetro

#### 4.2.4.2.1. Módulo de ruptura de tracción

El módulo de ruptura para este modo mecánico se define como el máximo esfuerzo de tracción que puede soportar el material antes del colapso; según la normativa ISO-22157-1 (2004) se lo calcula como la relación entre la fuerza aplicada y el área de longitud calibrada a través de la Ecuación (10),

$$MOR_i = \frac{F_{max}}{A} \quad (10)$$

donde  $MOR_i$  es el módulo de ruptura de tracción en la dirección  $i$  de la carga en (MPa),  $F_{max}$  es la carga máxima en la cual el espécimen falla en (N), y  $A$  es el área de la sección transversal de la longitud calibrada en ( $mm^2$ ).

#### 4.2.4.2.2. Módulo de elasticidad de tracción

El módulo de elasticidad de tracción se lo obtuvo directamente mediante el video extensómetro láser de la máquina de ensayo universales Shimadzu AGS-X, o a su vez, mediante el cálculo de la pendiente del rango elástico de la gráfica esfuerzo

de tracción versus deformación unitaria, ubicado entre el 20 y el 90% de la curva total (ISO-22157-1, 2004), calculado a través de la Ecuación (4).

#### 4.2.4.3. Resultados

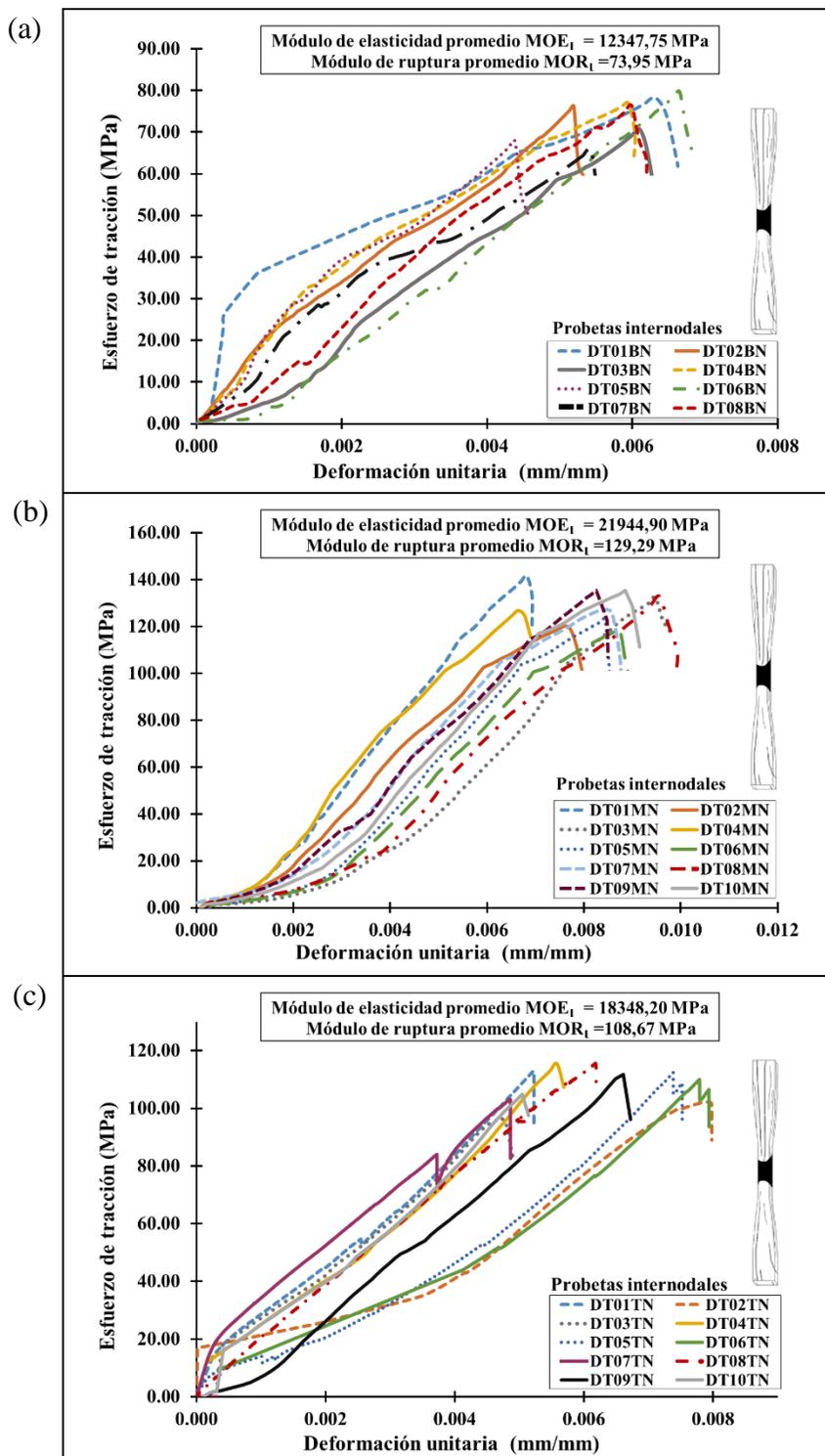
En la Tabla 30 se presentan los resultados promedio para 42 probetas (válidas del total) ensayadas bajo este modo mecánico, en cuanto a módulo de ruptura y módulo de elasticidad analizados en la dirección (L) del culmo, con sus correspondientes valores de densidad básica y contenido de humedad, mismas que fueron extraídas de la sección base, media y superior, respectivamente. El desglose total de resultados de las probetas ensayadas se presenta en el Anexo 7 de la presente investigación.

**Tabla 30**

*Resultados promedios seccionales para el ensayo de tracción en dirección (L) del D. asper*

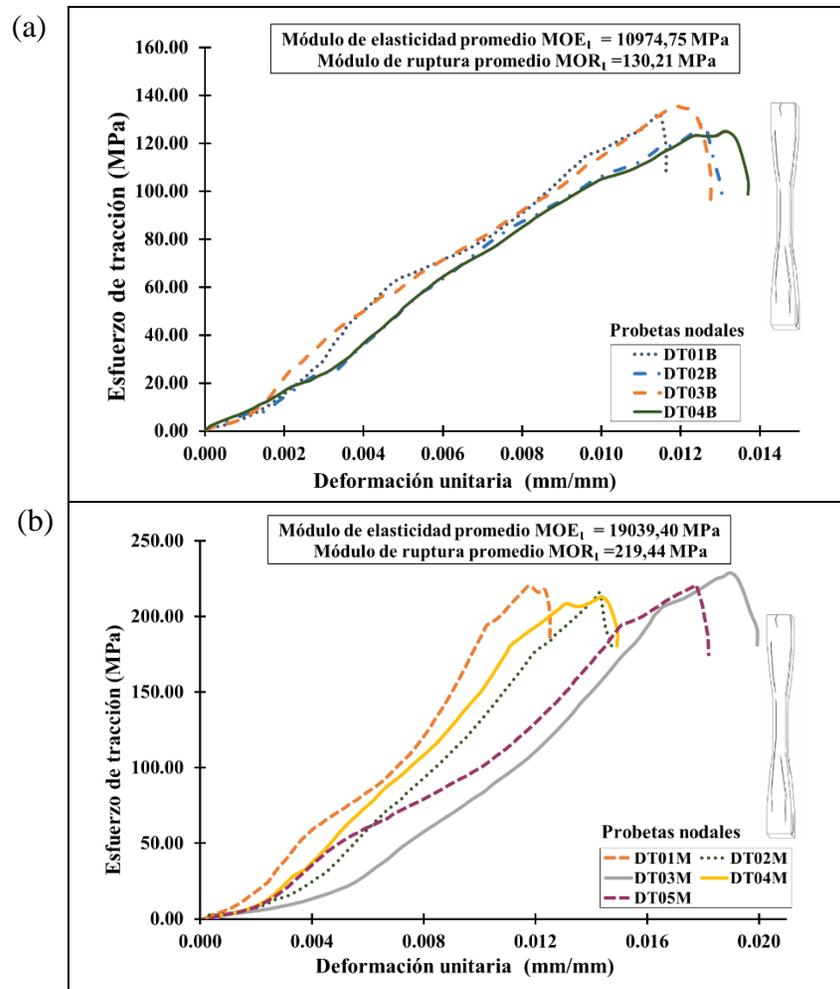
h (m)	Tipo	Nº de probetas	$\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	CoV	CH (%)	CoV	MOR <sub>L</sub> (MPa)	CoV	MOE <sub>L</sub> (MPa)	CoV
Base (1.5 m)	N	8	534,64	0,01	9%	0,05	73,95	0,07	12347,75	0,06
	IN	4	552,89	0,01	9%	0,05	130,21	0,04	10974,75	0,02
Media (6.0 m)	N	10	592,74	0,01	10%	0,06	129,29	0,06	21944,90	0,07
	IN	5	598,16	0,01	10%	0,07	219,44	0,03	19039,40	0,01
Superior (18.0 m)	N	10	572,04	0,02	9%	0,08	108,67	0,06	18348,40	0,03
	IN	5	566,21	0,01	9%	0,08	182,76	0,06	15193,20	0,02

La Figura 66 (a), (b) y (c) traza gráficamente el esfuerzo de tracción en dirección (L) versus la deformación unitaria para probetas nodales extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente; con las cuales se determinó sus correspondientes valores promedios de MOE<sub>L</sub> y MOR<sub>L</sub> para su respectiva altura de extracción.

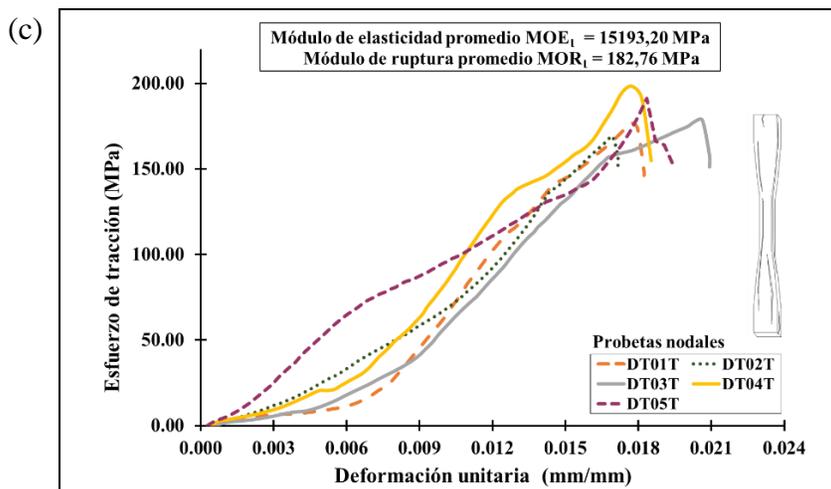


**Figura 66.** Curvas esfuerzo de tracción-deformación unitaria para probetas nodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Asimismo la Figura 67 (a), (b) y (c) traza gráficamente los mismos parámetros para probetas internodales extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente.



CONTINÚA →



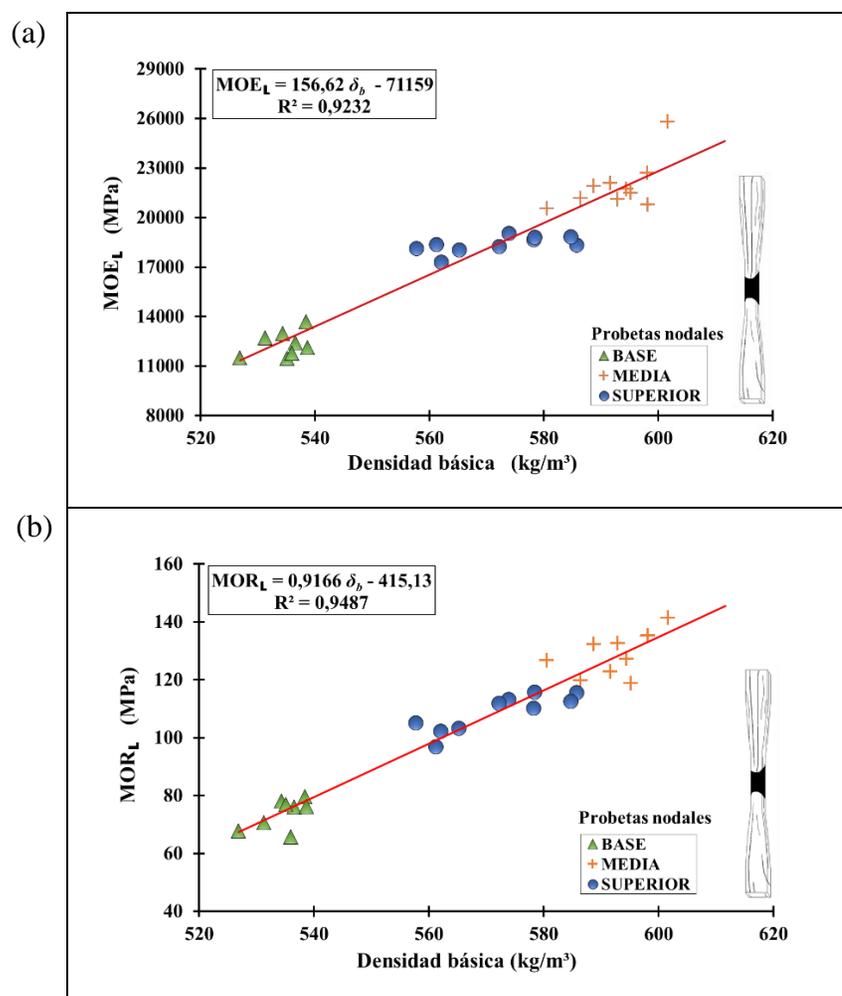
**Figura 67.** Curvas esfuerzo de tracción-deformación unitaria para probetas internodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Los resultados presentados en la Tabla 30 indican que los máximos valores de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  los presenta la sección media del culmo tanto en probetas nodales (21944,90 MPa y 129,29 MPa) como en probetas internodales (19039,40 MPa y 219,44 MPa) para una densidad básica promedio de  $592,74 \text{ kg/m}^3$  y  $598,16 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. Para ambas propiedades mecánicas los valores de la sección media fueron aproximadamente 1,75 y 1,20 veces mayor que la sección base y superior respectivamente, analizadas en los 2 tipos de probetas, lo cual es lógico debido a que la sección media posee la mayor concentración de fibras representada a través de su densidad básica (González, 2015; Liese, 1992).

Por otro lado, analizando los resultados de  $MOR_L$  se reporta que las probetas nodales alcanzaron valores aproximadamente 1,70 veces menores que las probetas internodales, esto por la presencia del nudo, el cual al ser una zona de convergencia de fibras genera un punto sensible de falla ante esfuerzos tensionales (Rodríguez

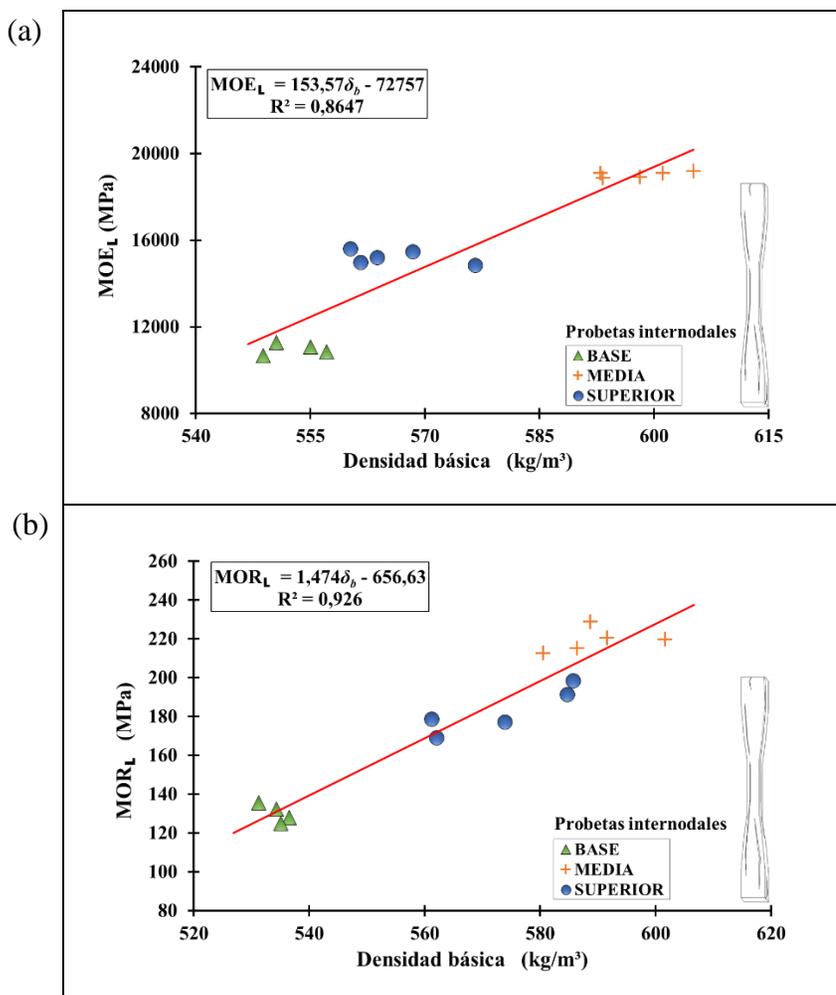
Hernández, 2017), lo que no sucede con las probetas internodales cuya concentración de esfuerzos se distribuye en toda la longitud de la probeta.

La Figura 68 (a) y (b) presenta la variación de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  respectivamente, en función de su densidad básica para probetas nodales; estas relaciones muestran una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,9232$ ) entre sus variables.



**Figura 68.** Relación de propiedades físico-mecánicas de tracción para probetas nodales (a)  $MOE_L$  - densidad básica y (b)  $MOR_L$  - densidad básica

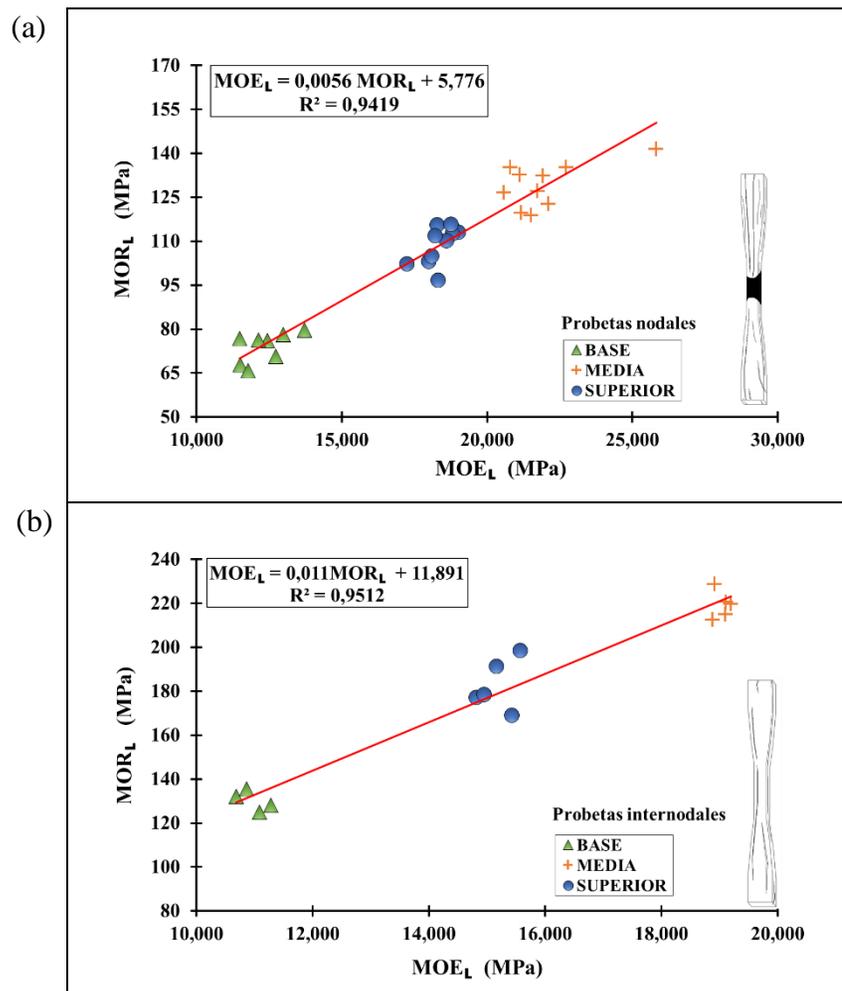
De igual manera la Figura 69 (a) y (b) presenta la variación de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  respectivamente, en función de su densidad básica para probetas internodales; estas relaciones muestran una buena correlación lineal ( $R^2 > 0,8647$ ) entre sus variables.



**Figura 69.** Relación de propiedades físico-mecánicas de tracción para probetas internodales (a)  $MOE_L$  - densidad básica y (b)  $MOR_L$  - densidad básica

Los resultados de  $MOE_L$  y  $MOR_L$  presentados en las Figura 68 y 78 en probetas nodales e internodales, respectivamente muestran una relación lineal directamente proporcional en función de su densidad básica, es decir, que a mayor densidad básica

mayor será su rigidez y resistencia de tracción. Por lo tanto, se demuestra a través de la Figura 70 que ambas propiedades mecánicas también se relacionan lineal y proporcionalmente entre sí, presentando una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,9419$ ) entre sus variables.



**Figura 70.** Relación de propiedades mecánicas de tracción MOR<sub>L</sub> - MOE<sub>L</sub> para probetas (a) internodales y (b) nodales.

Basándose en la normativa ISO-22157-1 (2004) y el estudio elaborado por Sánchez Medrano et al. (2016) se identificó 2 tipos de falla recurrente de acuerdo al

tipo de probeta ensayada (ver Figura 71) bajo el modo mecánico de tracción. El total de probetas ensayadas se muestra en el Anexo 8 del documento.



**Figura 71.** Tipos de falla en tracción (a) propagación de plasticidad con fractura progresiva en probetas nodales (DT08MN), y (b) desprendimiento paralelo a la fibra en probetas internodales (DT03B)

#### 4.2.4.4. Discusión

Con el fin de tener una fuente confiable de comparación se opta por utilizar únicamente los resultados de la sección media del culmo, debido a que ésta es la sección común de análisis en todos los estudios relacionados (ver Tabla 7).

En comparación con los resultados obtenidos en esta investigación (ver Tabla 30), Ghavami & Marinhno (2001) presentaron en sus probetas nodales un valor de  $MOE_L$  1,05 veces menor, esta baja variación ocurre a razón de la similitud en los contenido de humedad de las probetas ensayadas, las cuales estuvieron en el mismo rango de 8 a 10%; mientras que Carranza Armendáriz F. & Taco Álvarez J. (2011)

reportaron un valor 1,30 veces mayor, porque sus probetas tenían un alto contenido de humedad durante el ensayo mecánico (59%).

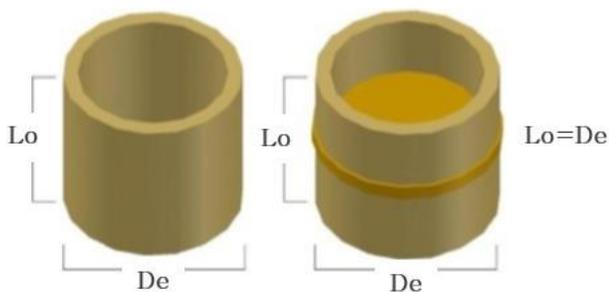
En lo que refiere a  $MOR_L$ , los valores reportados por Surjokusumo y Nugroho (1995), Carranza Armendáriz F. & Taco Álvarez J. (2011) y Ghavami & Marinhno (2001) se encuentran en el mismo orden de magnitud que el valor nominal de la actual investigación, cuya variación no excede de 1,08 veces, esto se debe a que la edad de los especímenes (*D. asper*) estuvieron en el mismo rango de 4 a 6 años. Por otro lado, el aumento de 1,55 veces mayor evaluado por Awalluddin et al. (2017) es ocasionado por la geometría que presentaron las probetas de su investigación, las cuales poseen un área transversal 3,6 veces menor que la configuración del actual estudio, por tanto es lógico que el esfuerzo de tracción aumente ante menor área de contacto [ver Ecuación (10)]. Por su parte, Bounsong Sompoh et al. (2013) presentaron un valor 1,28 y 1,58 veces mayor en probetas nodales e internodales respectivamente con relación a la propiedad mecánica en análisis, esto se atribuye a que los resultados experimentales finales para el ensayo de tracción fueron compensados mediante factores que consideraban la longitud de la fibra y el número de haces vasculares.

#### **4.2.5. Corte paralelo a la fibra**

La resistencia de corte es la propiedad que posee un material para soportar las fuerzas causantes del movimiento y deslizamiento de su estructura interna contra sí mismo (Bonilla Jiménez et al., 2017).

#### 4.2.5.1. Selección y preparación del material

Un total de 36 probetas fueron ensayadas bajo el modo mecánico de corte, las cuales se extrajeron de la sección basal (13), media (13) y superior (10) del culmo tratado (la edad estimada varía entre 4 y 5 años), siguiendo los lineamientos de la normativa ISO-22157-1 (2004) literal 11, en la cual se establece utilizar probetas con y sin nudo en proporción 50/50, con una longitud ( $L_o$ ) de igual dimensión al diámetro externo ( $D_e$ ) de las mismas (ver Figura 72) verificando que presenten una superficie lisa y plana con una desviación máxima de 0,2 mm. Cabe mencionar que la cantidad de probetas en cada sección de análisis no fue idéntica ya que se desechó aquellas que no presentaban óptimas condiciones de ensayo.



**Figura 72.** Dimensiones nominales de las probetas para el ensayo de corte

Las Tablas 31, 32 y 33 presentan las propiedades geométricas de cada probeta ensayada especificando 4 medidas de longitud y 4 de espesor (pertenecientes a sus 4 áreas de cizallamiento o corte), así como también el diámetro externo y el resultado de su área de contacto; éstas fueron extraídas a alturas nominales de 1 m (sección base), 6 m (sección media) y 18 m (sección superior), obteniendo así un mapeo del tejido estructural completo de la especie.

**Tabla 31***Dimensionamiento de las probetas de corte (sección base  $h=1.0$  m).*

PROBETA	Longitud				Espesor				Diámetro externo	Área de contacto
	Lo <sub>1</sub> (mm)	Lo <sub>2</sub> (mm)	Lo <sub>3</sub> (mm)	Lo <sub>4</sub> (mm)	e <sub>1</sub> (mm)	e <sub>2</sub> (mm)	e <sub>3</sub> (mm)	e <sub>4</sub> (mm)	De (mm)	$\Sigma (Lo_i * e_i)$ (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Internodales</b>										
DR01B	156,50	155,50	157,00	157,00	10,00	10,00	9,50	9,50	160,00	6103,00
DR02B	144,50	143,50	145,00	145,00	14,00	13,00	14,00	12,50	166,25	7731,00
DR03B	134,00	137,00	137,00	134,00	11,00	10,00	11,50	11,00	156,50	5893,50
DR04B	157,00	158,50	160,50	155,50	8,00	8,50	8,50	8,00	152,25	5211,50
DR05B	156,50	159,50	160,00	156,00	9,00	10,50	10,00	11,00	152,00	6399,25
DR06B	154,00	153,00	152,00	153,50	9,00	9,50	10,00	10,50	164,00	5971,25
<b>Probetas Nodales</b>										
DR01BN	149,00	152,00	155,50	153,00	9,50	10,00	10,50	10,00	160,50	6098,25
DR02BN	150,50	149,00	148,00	149,00	10,50	10,50	10,00	11,00	165,75	6263,75
DR03BN	158,00	155,00	155,00	155,00	11,50	11,50	12,00	11,00	171,75	7164,50
DR04BN	156,00	159,00	158,00	157,50	17,00	16,00	16,50	17,00	152,50	10480,50
DR05BN	151,00	150,00	150,00	151,00	14,50	15,50	15,00	17,00	147,75	9331,50
DR06BN	151,00	152,00	153,50	152,00	14,50	15,50	15,00	14,00	142,50	8976,00
DR07BN	157,50	158,00	158,00	157,50	14,50	13,50	13,50	13,50	138,50	8676,00

**Tabla 32***Dimensionamiento de las probetas de corte (sección media  $h=6.0$  m).*

PROBETA	Longitud				Espesor				Diámetro externo	Área de contacto
	Lo <sub>1</sub> (mm)	Lo <sub>2</sub> (mm)	Lo <sub>3</sub> (mm)	Lo <sub>4</sub> (mm)	e <sub>1</sub> (mm)	e <sub>2</sub> (mm)	e <sub>3</sub> (mm)	e <sub>4</sub> (mm)	De (mm)	$\Sigma (Lo_i * e_i)$ (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Internodales</b>										
DR01M	143,50	144,00	147,00	147,00	8,50	8,00	8,50	8,00	147,75	4797,25
DR02M	142,00	144,00	143,50	142,00	9,00	10,00	10,00	9,00	148,50	5431,00
DR03M	149,00	148,00	147,50	147,00	8,00	7,00	9,00	9,00	142,00	4878,50
DR04M	127,50	128,50	127,50	126,00	9,50	9,00	9,00	8,50	125,75	4586,25
DR05M	144,00	144,00	143,50	143,50	8,00	8,00	8,00	7,50	147,25	4528,25
<b>Probetas Nodales</b>										
DR01MN	154,50	154,00	154,50	155,00	9,00	8,50	8,50	9,00	157,25	5407,75
DR02MN	158,00	156,00	154,00	153,50	9,00	9,00	9,00	9,00	158,25	5593,50
DR03MN	153,50	154,00	154,50	154,00	8,00	8,50	8,00	8,50	155,50	5082,00
DR04MN	141,00	141,00	142,00	142,50	7,50	7,50	6,50	7,00	141,75	4035,50
DR05MN	156,00	154,00	156,00	156,00	12,00	11,50	11,50	11,50	134,50	7231,00
DR06MN	128,00	128,00	128,50	128,50	10,00	10,00	9,00	10,00	123,75	5001,50
DR07MN	130,00	130,00	129,00	129,00	8,50	9,00	9,00	9,00	124,00	4597,00
DR08MN	135,00	136,00	130,00	134,00	7,50	7,50	7,00	7,50	146,00	3947,50

**Tabla 33**

*Dimensionamiento de las probetas de corte (sección superior  $h=18.0$  m).*

PROBETA	Longitud				Espesor				Diámetro externo	Área de contacto
	Lo1 (mm)	Lo2 (mm)	Lo3 (mm)	Lo4 (mm)	e1 (mm)	e2 (mm)	e3 (mm)	e4 (mm)	De (mm)	$\Sigma (Lo_i * e_i)$ (mm <sup>2</sup> )
<b>Probetas Internodales</b>										
<b>DR01T</b>	132,50	132,50	133,00	133,00	6,00	6,50	6,00	7,00	134,00	3385,25
<b>DR02T</b>	102,00	102,00	101,00	101,50	4,50	4,00	4,50	4,00	85,50	1727,50
<b>DR03T</b>	102,50	103,00	103,50	103,00	4,50	4,00	4,50	4,50	82,50	1802,50
<b>DR04T</b>	122,00	121,80	122,00	122,30	5,10	5,20	5,10	5,10	110,75	2501,49
<b>DR05T</b>	110,80	111,00	111,00	110,50	4,70	4,80	4,80	4,70	95,90	2105,71
<b>Probetas Nodales</b>										
<b>DR01TN</b>	138,00	138,00	138,00	137,00	7,00	7,00	6,50	6,00	131,75	3651,00
<b>DR02TN</b>	149,00	149,00	149,00	150,00	7,00	7,00	7,50	7,00	141,25	4253,50
<b>DR03TN</b>	124,00	124,00	123,50	124,50	10,50	9,50	9,00	10,00	123,75	4836,50
<b>DR04TN</b>	120,50	119,00	120,00	121,50	7,50	7,00	8,00	7,00	130,25	3547,25
<b>DR05TN</b>	124,00	125,50	124,00	125,00	6,50	6,50	7,00	7,50	129,00	3427,25

Cada probeta se preparó según las exigencias de la normativa ISO-22157-1 (2004) sección 11.4, donde se indica que las 4 marcas de corte establecidas deben estar perfectamente alineadas entre las caras de la probeta, además se debe mantener un control de calidad similar al realizado en compresión. El equipo utilizado en este ensayo fue el mismo que en el ensayo de compresión como se indicó en el numeral 4.2.2.1 (ver Figura 45 y 46).

#### **(a) Aditamentos**

En este caso se utilizó una placa especial de cizallamiento conocida como "placa mariposa", cuya superficie tiene dos cuartas partes huecas (ver Figura 73), esta configuración garantizó la generación de las cuatro áreas de desplazamiento típicas de este modo mecánico.



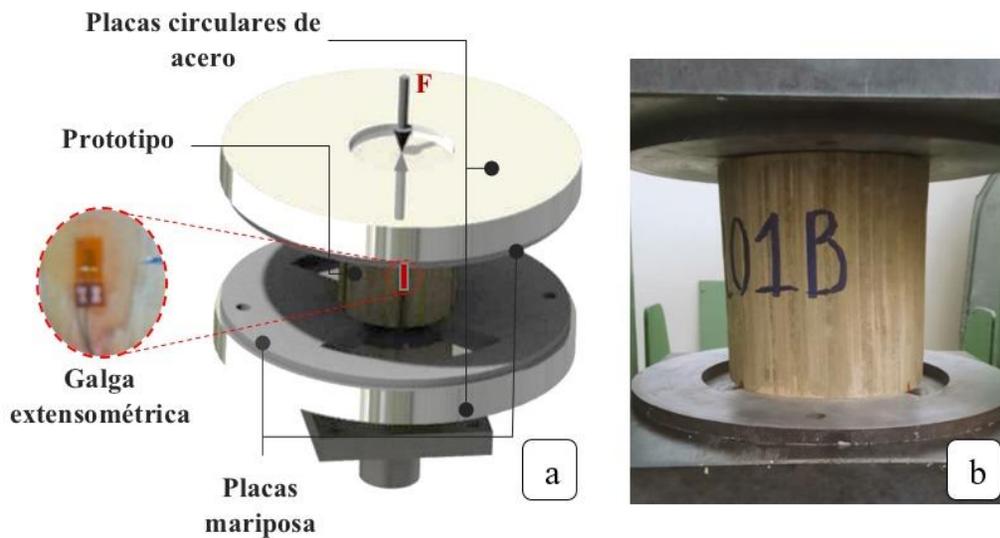
**Figura 73.** Placa especial de cizallamiento o corte (configuración mariposa)

#### **(b) Strain gauges**

En este ensayo también se contó con el uso de galgas extensométricas [strain gauges, ver Figura 46 (a)], mismas que fueron adheridas a las probetas mediante el mismo proceso especificado en el numeral 4.2.2.1 (b).

#### **4.2.5.2. Protocolo de ensayo**

Para la realización de este ensayo la probeta fue colocada entre placas circulares de acero perfectamente alineadas con la celda de carga, esta configuración permitió distribuir la carga aplicada en las zonas de corte previamente establecidas por las por la placa mariposa (ver Figura 74) y aseguró que la fuerza sea ejercida en la dirección longitudinal (L) paralela a las fibras y perpendicular al área de contacto (T-R) a una velocidad de 0,01 mm/s accionada mediante la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033 (ver Figura 45). Esto garantizó que todos los ensayos se lleven a cabo en un lapso de 3 a 5 min, dependiendo de las propiedades físicas de la probeta. Además cabe recalcar que, previo al registro de datos se aplicó una carga de acoplamiento de 1 kN (ISO-22157-1, 2004). Para cada probeta ensayada se determinó su módulo de rigidez (G) y su correspondiente esfuerzo de corte máximo ( $\tau_{\max}$ ).



**Figura 74.** Ensayo de corte paralelo a la fibra (a) detalle del protocolo operativo de ensayo, y (b) vista real de la probeta en la máquina de ensayo

#### 4.2.5.2.1. Esfuerzo de corte máximo

Este parámetro expresa la tensión de corte máximo que un material puede soportar previo al fallo mecánico (Bonilla Jiménez et al., 2017). El esfuerzo máximo de corte paralelo a la fibra se calculó según la normativa ISO-22157-1 (2004) a través de la Ecuación (11),

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\sum(e * Lo)} \quad (11)$$

donde  $\tau_{max}$  es el esfuerzo máximo de corte en (MPa),  $F_{max}$  es la carga máxima en la cual el espécimen falla en (N), y  $\sum(e * Lo)$  es la sumatoria de los cuatro productos de espesor (e) y longitud (Lo) en (mm<sup>2</sup>).

#### 4.2.5.2.2. Módulo de rigidez

El módulo de rigidez, también llamado módulo de cizalla, es una constante elástica que describe el cambio de forma que experimenta un material cuando se le aplican esfuerzos cortantes (Gere y Timoshenko, 2009). Esta propiedad se calculó en la dirección longitudinal (L) del culmo a través de la regresión lineal perteneciente a la región elástica de la curva esfuerzo de corte versus deformación unitaria (Kliger y Pellicane, 1996), expuesta en la Ecuación (12),

$$\tau_i = 2 * G_i * \varepsilon_i \quad (12)$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte en (MPa),  $G$  es el módulo de rigidez en (MPa),  $\varepsilon$  es la deformación unitaria en (mm/mm), e  $i$  es la dirección de carga.

Los datos de deformación unitaria generados a través de las galgas extensométricas, así como los valores de esfuerzo de corte obtenidos en laboratorio permitieron elaborar las gráficas esfuerzo de corte-deformación unitaria encontrando el valor de la pendiente en el rango elástico comprendido entre el 10 y el 70% del total de la curva (ISO-22157-1, 2004).

#### 4.2.5.3. Resultados

En la Tabla 34 se presentan los resultados promedio para 36 probetas ensayadas bajo el modo mecánico de corte, en cuanto a esfuerzo máximo de corte y módulo de rigidez analizados en la dirección (L) del culmo, con sus correspondientes valores de densidad básica y contenido de humedad para probetas internodales y nodales (IN/N), mismas que fueron extraídas de la sección base, media y superior, respectivamente. El

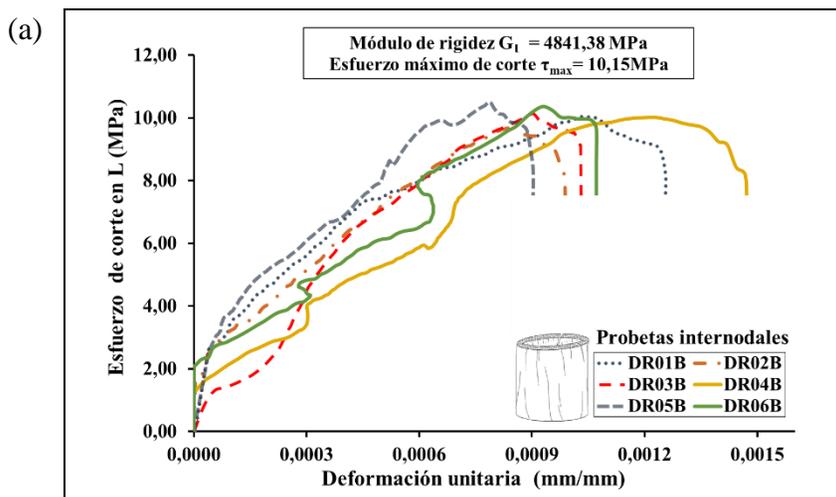
desglose total de resultados de las probetas ensayadas se presenta en el Anexo 9 de la presente investigación.

**Tabla 34**

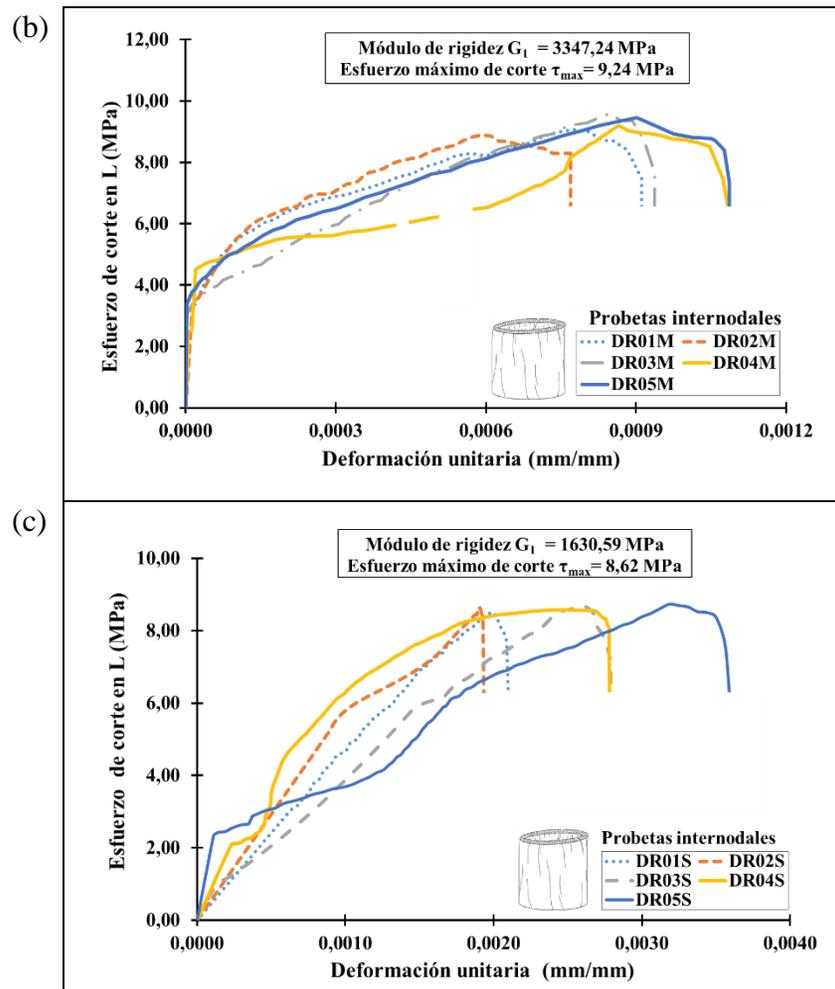
*Resultados promedios seccionales para el ensayo de corte en dirección (L) del *D. asper**

h (m)	Tipo	N° de probetas	$\delta_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	CoV	CH (%)	CoV	$\tau_{max}$ (MPa)	CoV	$G_L$ (MPa)	CoV
Base (1.0 m)	IN	6	640,97	0,02	12%	0,03	10,15	0,02	4841,38	0,08
	N	7	688,84	0,10	12%	0,04	10,12	0,09	5414,84	0,21
Media (6.0 m)	IN	5	515,49	0,06	12%	0,04	9,24	0,03	3347,24	0,12
	N	8	629,33	0,09	12%	0,04	9,32	0,07	4051,98	0,15
Superior (18.0 m)	IN	5	464,14	0,04	11%	0,00	8,63	0,01	1630,59	0,18
	N	5	536,65	0,03	11%	0,09	8,23	0,05	2391,28	0,13

La Figura 75 (a), (b) y (c) traza gráficamente el esfuerzo de corte en dirección (L) versus la deformación unitaria para probetas internodales extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente; con las cuales se determinó sus correspondientes valores promedios de  $\tau_{max}$  y  $G_L$  para su respectiva altura de extracción.

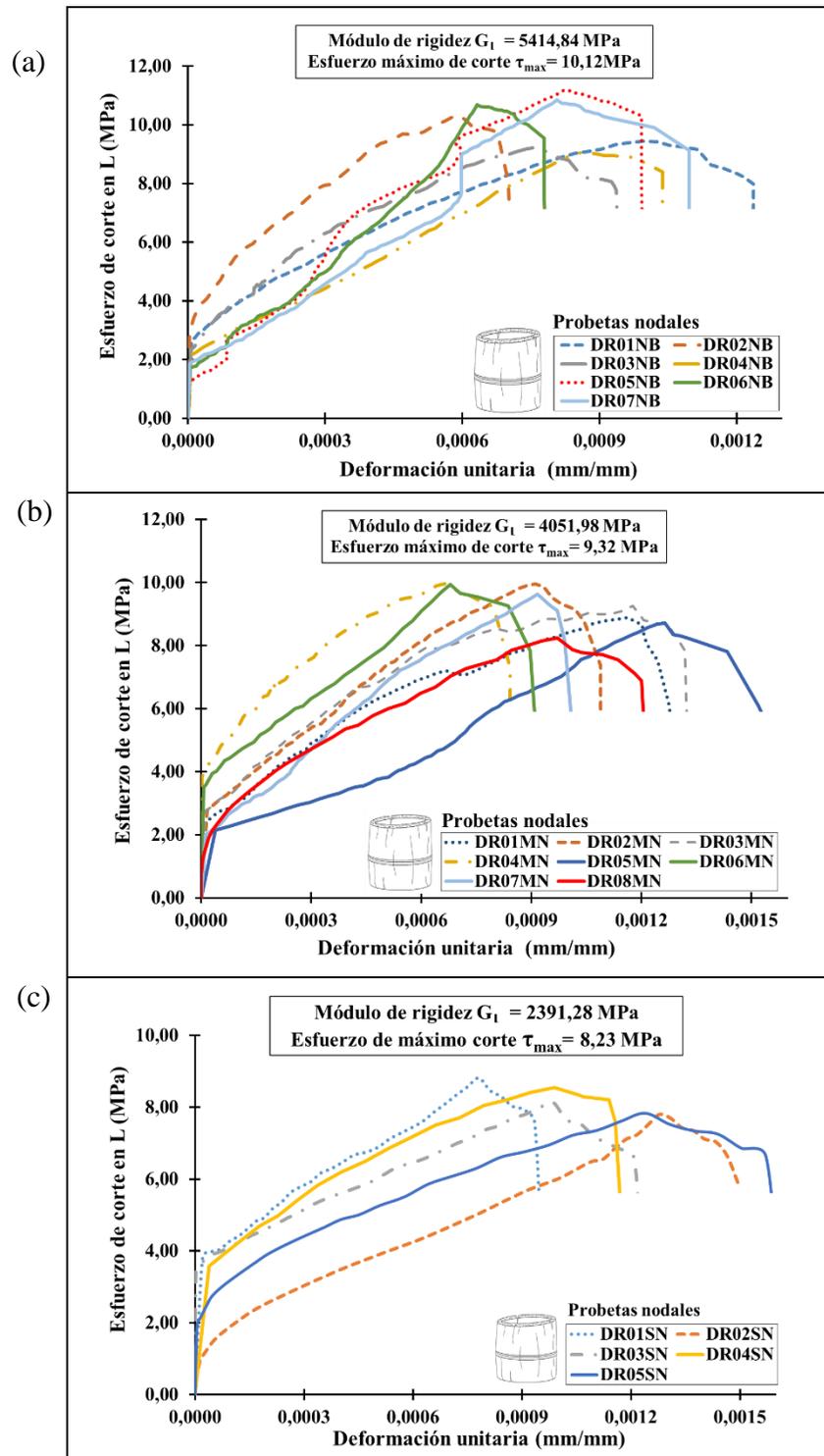


CONTINÚA →



**Figura 75.** Curvas esfuerzo de corte-deformación unitaria para probetas internodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Asimismo la Figura 76 (a), (b) y (c) traza gráficamente los mismos parámetros para probetas nodales extraídas de la sección base, media y superior del culmo, respectivamente.

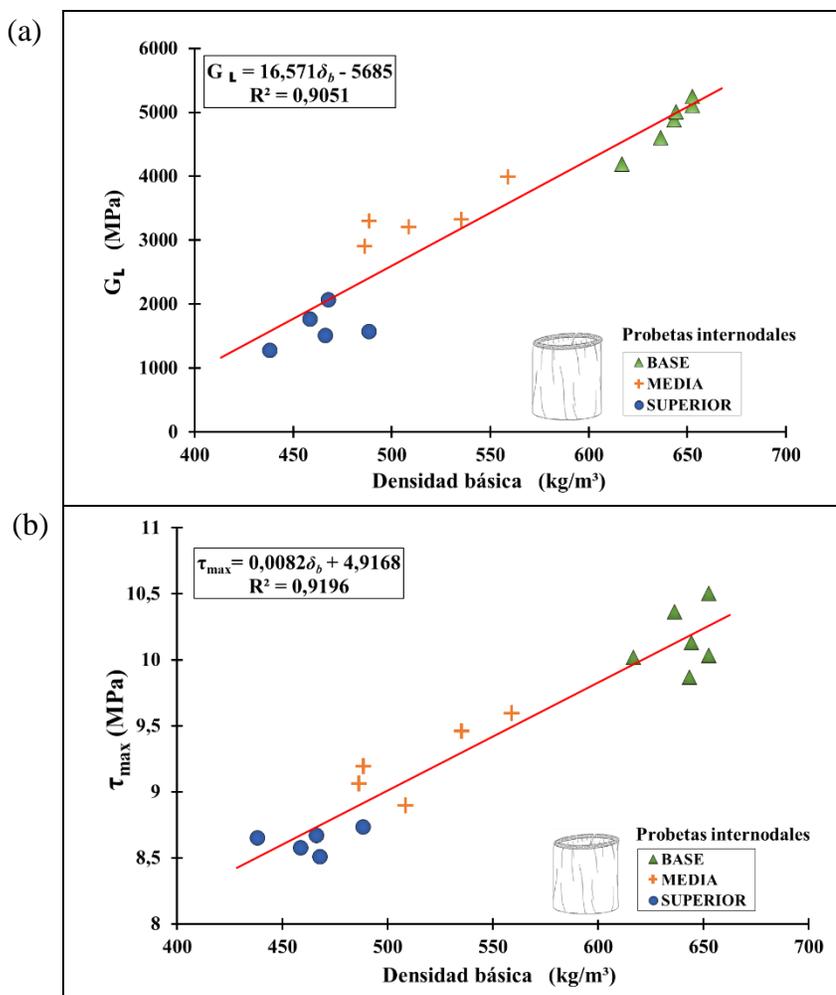


**Figura 76.** Curvas esfuerzo de corte-deformación unitaria para probetas nodales en la sección (a) base, (b) media, y (c) superior del culmo

Los resultados presentados en la Tabla 34 indican que los máximos valores de  $G_L$  los presenta la sección base del culmo tanto en probetas nodales (5414,84 MPa) como en probetas internodales (4841,38 MPa) para una densidad básica promedio de 688,84 kg/m<sup>3</sup> y 640,97 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente; estos valores son 2,26 y 2,97 veces mayores en magnitud que las correspondientes localizadas en la sección superior, reflejando una sección del culmo que en su base es entre 2 y 3 veces más rígida que su sección superior; lo cual es lógico debido a que el culmo debe ser más flexible en función de su altura debido a que las presiones de viento son progresivas respecto a la misma (González, 2015). De la misma manera, en cuanto a  $\tau_{max}$ , la sección base presenta resultados 1,18 y 1,23 veces mayor que en la sección superior para probetas nodales e internodales, respectivamente; esta tendencia es producto de la reducción progresiva de la sección del culmo conforme aumenta su altura, presentando una disminución en el área de contacto de la sección base y superior con 63% y 52% en probetas internodales y nodales.

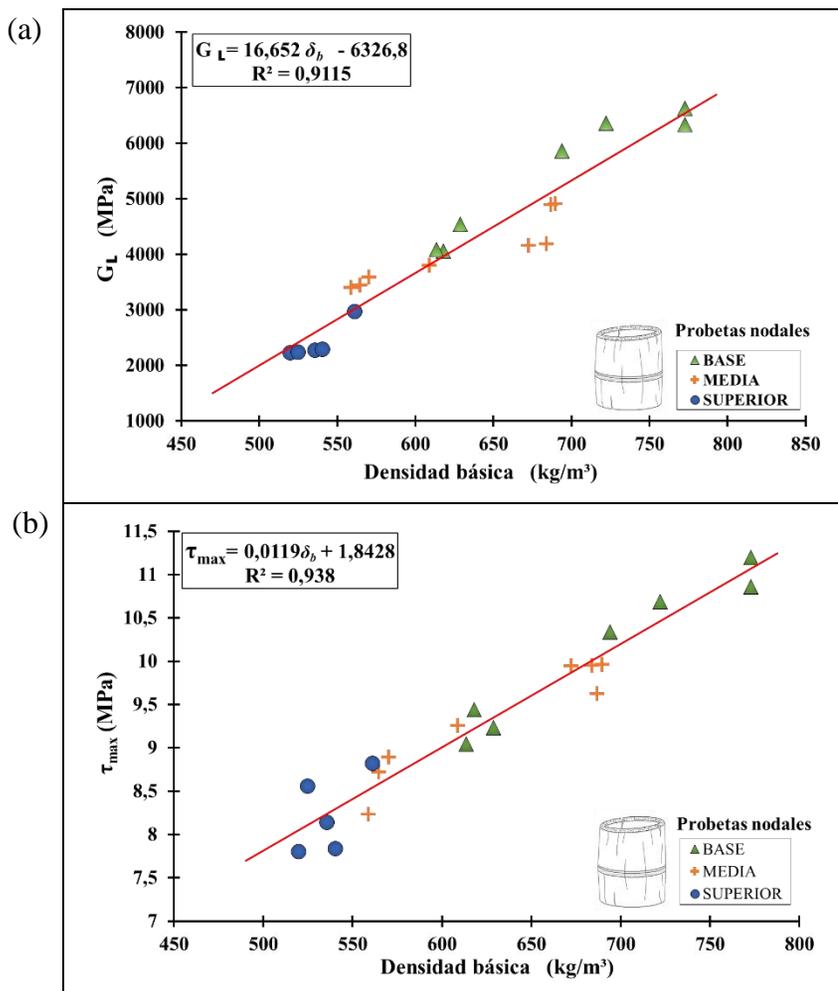
Por otro lado, en lo que refiere a  $\tau_{max}$  (Tabla 34) las probetas nodales presentaron valores de hasta 1,47 veces mayores en magnitud que las probetas internodales analizadas en las 3 secciones del culmo; esta tendencia ascendente se debe a la presencia del nudo que proporciona mayor rigidez y soporte a la planta, apegándose al funcionamiento de una conexión articulada la cual distribuye la carga puntual sobre una superficie de contacto (Bonilla Jiménez et al., 2017).

La Figura 77 (a) y (b) presenta la variación de  $\tau_{\max}$  y  $G_L$  respectivamente, en función de su densidad básica para probetas internodales; estas relaciones muestran una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,9051$ ) entre sus variables.



**Figura 77.** Relación de propiedades físico-mecánicas de corte para probetas internodales (a)  $G_L$  - densidad básica y (b)  $\tau_{\max}$  - densidad básica

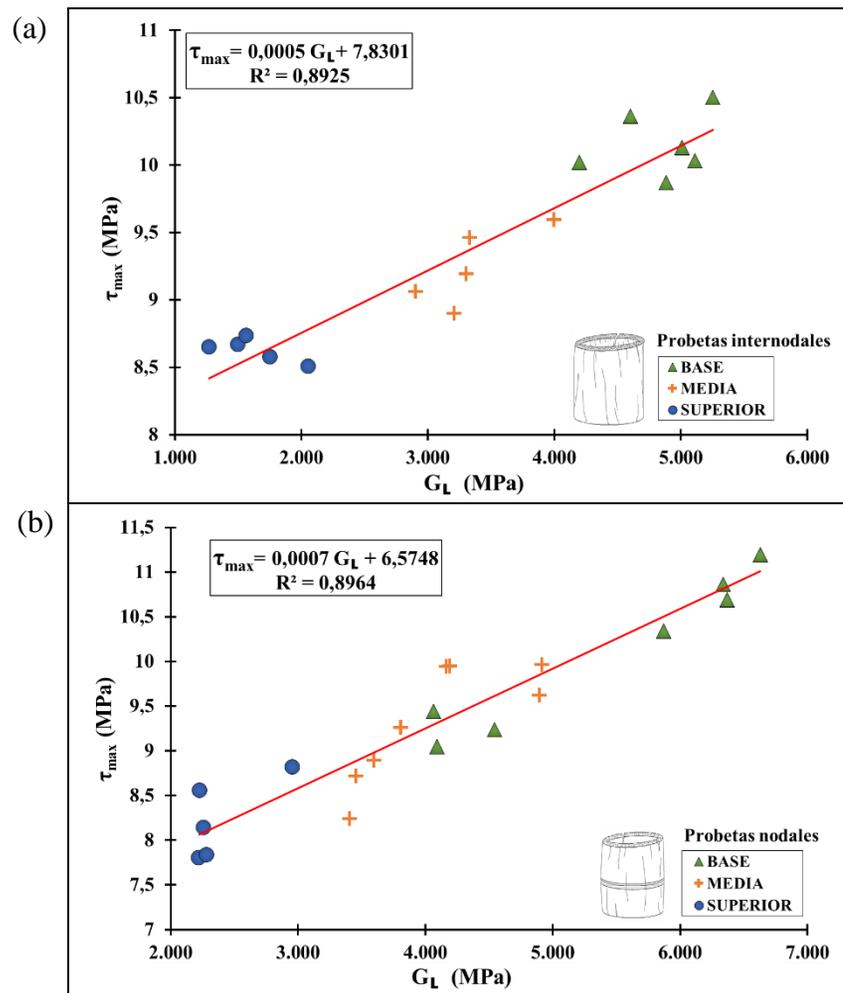
De igual manera la Figura 78 (a) y (b) presenta la variación de  $\tau_{\max}$  y  $G_L$  respectivamente, en función de su densidad básica para probetas nodales; estas relaciones muestran una buena correlación lineal ( $R^2 > 0,9115$ ) entre sus variables.



**Figura 78.** Relación de propiedades físico-mecánicas de corte para probetas nodales (a)  $G_L$  - densidad básica y (b)  $\tau_{max}$  - densidad básica

Los resultados de  $G_L$  y  $\tau_{max}$  presentados en las Figura 77 y 68 en probetas internodales y nodales respectivamente, muestran una relación lineal directamente proporcional en función de su densidad básica, es decir, que a mayor densidad básica mayor será su rigidez y resistencia de corte. Por lo tanto, se demuestra a través de la Figura 79 que ambas propiedades mecánicas también se relacionan lineal y

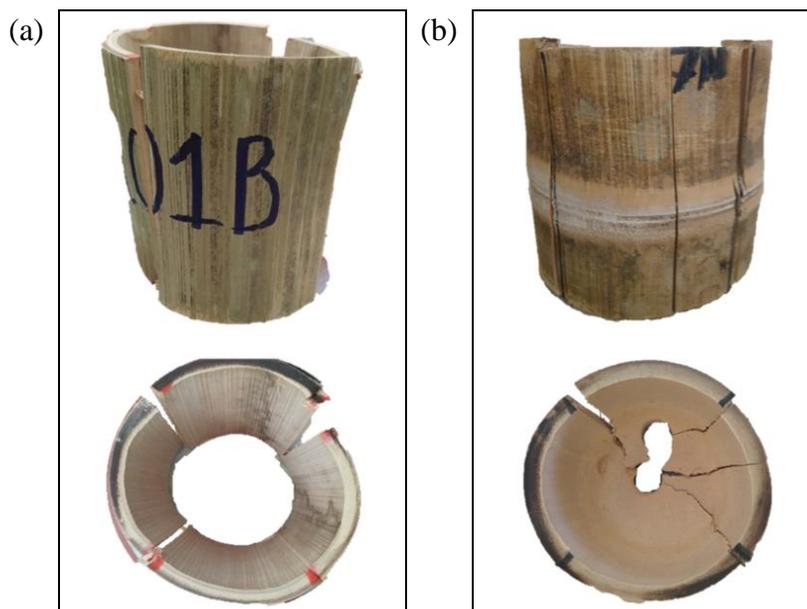
proporcionalmente entre sí, presentando una alta correlación lineal ( $R^2 > 0,8925$ ) entre sus variables.



**Figura 79.** Relación de propiedades mecánicas de corte  $\tau_{\max}$  -  $G_L$  para probetas (a) internodales y (b) nodales.

Basándose en la normativa ISO-22157-1 (2004) y el estudio elaborado por Sánchez Medrano et al. (2016) se identificó un tipo de falla recurrente (Figura 80) presentado en todas las probetas (internodales y nodales) ensayadas bajo el modo

mecánico de corte. El total de probetas ensayadas se muestra en el Anexo 10 del documento



**Figura 80.** Falla total por tensión de las fibras y parénquima en las probetas (a) internodales (DR01B) y (b) nodales (DR07BN)

#### 4.2.5.4. Discusión

Con el fin de tener una fuente confiable de comparación se opta por utilizar únicamente los resultados de la sección media del culmo, debido a que ésta es la sección común de análisis en todos los estudios relacionados (ver Tabla 8).

Debido a que la normativa ISO-22157-1 (2004) que rige la evaluación sobre este ensayo no contempla la obtención del módulo de rigidez ( $G_L$ ), no se ha logrado recopilar información relevante para esta propiedad, sin embargo, los autores de esta investigación han planteado la posibilidad de estimar su valor en función de los  $\tau_{max}$  obtenidos por Bounsong Sompoh et al. (2013) y Surjokusumo y Nugroho (1995),

mismos que fueron reemplazados en las ecuaciones de regresión para el *D. asper* del actual estudio [ver Figura 79 (a) y (b)]; cabe recalcar que, éstos resultados no fueron comparados mediante las ecuaciones presentes en las Figura 77 (a) y 78 (a), a razón de que el análisis de densidad básica en las investigaciones relacionadas fue obtenido como un promedio evaluado en regiones húmedas y secas (referirse a la sección 3.1.1); no obstante, estas ecuaciones si permiten su aplicación con respecto a las densidades básicas llevadas a cabo por Ghavami & Marinhno (2001) y Carranza Armendáriz F. & Taco Álvarez J. (2011). Todas estas consideraciones están sujetas a variaciones matemáticas que provocan desviaciones en los resultados.

Con respecto al análisis comparativo del  $\tau_{\max}$  se puede concluir que, las mínimas variaciones existentes entre los especímenes evaluados por Bounsong Sompoh et al. (2013) y Surjokusumo y Nugroho (1995) respecto al reportado por los autores, es causado por la alta similitud (92% aproximadamente) en sus promedios de contenido de humedad.

#### **4.2.6. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para cálculo estructural**

El análisis mecánico no estaría completamente definido sin la presencia de esfuerzos admisibles, los cuales cumplen un papel fundamental en el diseño estructural en base al material estudiado. Los esfuerzos admisibles en materiales tradicionales son definidos por los códigos de construcción de cada región o país; éstos valores son proporcionales a los obtenidos en la región elástica del material (E.100-Bambú, 2012); es por ello que, posteriormente al

análisis mecánico del *D. asper* sus valores alcanzados serán disminuidos en cierto factor para que en el diseño estructural no se trabaje a última resistencia.

#### 4.2.6.1. Determinación de valores característicos

La normativa ISO-22156 (2004) sección 7.2.1 establece que para determinar los esfuerzos admisibles a partir de los esfuerzos mecánicos finales del biomaterial ensayado, primero se debe calcular los valores característicos, los cuales deben contar con un 75% de fiabilidad en los resultados de la población general, dicho rango de confianza será evaluado mediante la Ecuación (13),

$$R_k = R_{0.05} \left( 1 - \frac{2.7 * \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right) \quad (13)$$

donde  $R_k$  es el valor característico en la sollicitación de cada ensayo,  $R_{0.05}$  es el percentil 5 de los datos en la sollicitación de cada ensayo,  $s$  es la desviación estándar de los datos determinados en laboratorio,  $m$  es el promedio de los datos determinados en laboratorio y  $n$  es el número de datos de cada ensayo.

#### 4.2.6.2. Determinación de los esfuerzos admisibles

Luego de obtener los valores característicos para cada sollicitación externa, éstos deben ser corregidos por factores que consideran la reducción de resistencia en un tiempo determinado y las condiciones en las que fueron evaluadas las probetas, definiendo con estas apreciaciones los esfuerzos admisibles mediante la Ecuación (14) proporcionada por la ISO-22156 (2004) sección 7.4,

$$\sigma_{adm} = R_k * G * \frac{D}{S} \quad (14)$$

donde  $\sigma_{adm}$  es el esfuerzo admisible independiente para cada ensayo,  $R_k$  es el valor característico para cada uno de los ensayos,  $G$  es el coeficiente de modificación para la diferencia entre la calidad del laboratorio y los ensayos (0,5 como valor predeterminado),  $D$  es el coeficiente de modificación por fallos en la duración de carga, se concibe: 1,0 para cargas permanentes (M), 1,25 para una combinación entre permanentes y temporales (M+V) y 1,5 para la misma combinación anterior más la carga de viento (M+V+W), y  $S$  es el factor de seguridad aplicado (2,25).

De igual manera, la normativa colombiana NSR (2010) en la sección G12.7 inicialmente se rige con la misma fórmula de la normativa internacional ISO-22156 (2004) para la determinación de los valores característicos con la Ecuación (13), pero plantea una ecuación diferente para el cálculo de los esfuerzos admisibles, compuesta con factores de reducción específicos en función al modo mecánico de análisis, como se expone en la Ecuación (15),

$$\sigma_{admi} = \frac{FC}{F_s * FDC} * R_k \quad (15)$$

donde  $\sigma_{admi}$  es el esfuerzo admisible independiente para cada solicitud de ensayo,  $R_k$  es el valor característico para la solicitud de cada uno de los ensayos,  $FC$  es el factor de reducción por diferencias entre las condiciones de ensayo en el laboratorio y la funcionalidad real bajo la aplicación de cargas (1,0 para el ensayo de flexión, compresión paralela y perpendicular; 0,5 para tracción y 0,6 para corte),  $F_s$  es el factor de seguridad (2,0 para los ensayos de flexión y tracción; 1,5 para compresión paralela y 1,8 para los ensayos de corte y compresión perpendicular),  $FDC$  es el factor utilizado

para la duración de carga (1,5 para ensayos de flexión y tracción; 1,2 para compresión paralela y perpendicular y 1,1 para corte).

**Nota:** Los valores característicos y los esfuerzos admisibles contemplan las mismas unidades en las que se haya trabajado toda la investigación.

#### **4.2.6.3. Determinación de los módulos de elasticidad y rigidez**

Adicionalmente, serán determinados 3 valores de módulos de elasticidad y rigidez (según el modo mecánico analizado), siendo (i) módulo promedio ( $MOE_{0,5}$  o  $G_{0,5}$ ) que se utilizará para los elementos estructurales como módulo de elasticidad general, (ii) módulo mínimo ( $MOE_{min}$  o  $G_{min}$ ), utilizado para calcular el coeficiente de estabilidad en vigas y columnas y (iii) módulo percentil 5 ( $MOE_{0,05}$  o  $G_{0,05}$ ), utilizado para calcular las deflexiones cuando las condiciones de servicio son críticas (NSR, 2010). Independientemente de lo que requiera el proyecto o la investigación, se permite un libre criterio de selección de los valores presentados, de acuerdo a las solicitudes del cálculo estructural.

#### **4.2.6.4. Resultados**

En la Tabla 35 se detalla los cálculos requeridos para obtener el valor característico de cada modo mecánico en todas las secciones del culmo (base, media y superior), la ecuación presentada procede de las normas internacionales citadas previamente en la sección 4.2.6.1.

**Tabla 35**

*Cálculo del valor característico para los modos mecánicos analizados en el D. asper bajo la normativa ISO 22156:2004*

Referencia Normativa		ISO 22156:2004				
Ensayo	Sección	R <sub>0,05</sub>	s	m	n	R <sub>k</sub>
<b>COMPRESIÓN</b>	B-IN	61,91	5,94	71,82	12	<b>57,92</b>
	M-IN	60,11	5,04	68,07	12	<b>56,65</b>
	S-IN	57,82	4,16	62,98	13	<b>54,96</b>
<b>CORTE</b>	B-IN	9,91	0,24	10,15	6	<b>9,65</b>
	M-IN	8,93	0,29	9,24	5	<b>8,59</b>
	S-IN	8,52	0,09	8,62	5	<b>8,41</b>
	B-N	9,11	0,86	10,12	7	<b>8,32</b>
	M-N	8,41	0,66	9,32	8	<b>7,84</b>
	S-N	7,81	0,45	8,23	5	<b>7,29</b>
<b>TRACCIÓN</b>	B-IN	125,44	4,64	130,21	4	<b>119,40</b>
	M-IN	213,23	6,19	219,44	5	<b>205,96</b>
	S-IN	170,54	11,79	182,76	5	<b>157,25</b>
	B-N	66,52	5,12	73,95	8	<b>62,13</b>
	M-N	119,31	7,40	129,29	10	<b>113,47</b>
	S-N	100,10	6,07	108,67	10	<b>95,32</b>
<b>FLEXIÓN</b>	B	114,72	3,68	117,97	3	<b>109,14</b>
	M	106,30	1,75	107,54	3	<b>103,60</b>
	S	66,46	3,14	70,17	4	<b>62,45</b>

En la Tabla 36 se presentan los valores de esfuerzos admisibles obtenidos mediante las ecuaciones de la norma ISO 22156:2004 destacando tres valores según la condición de carga para generar  $\sigma_{adm}$  (a), mientras que la norma NSR-10 (AIS, 2010) propone un solo valor para el  $\sigma_{adm}$  (b).

**Tabla 36**

*Cálculo de los esfuerzos admisibles para los modos mecánicos analizados en el D. asper bajo las normativas ISO 22156:2004 y NSR-10 (AIS, 2010)*

Referencia Normativa	Sección	ISO 22156:2004					NSR-10 (AIS, 2010)			$\sigma_{adm}$ (b) MPa
		Rk	G	M (MPa)	M+V (MPa)	M+V+W (MPa)	FC	Fs	FDC	
<b>COMPRESIÓN</b>	B-IN	57,92	0,50	<b>12,87</b>	<b>16,09</b>	<b>19,31</b>	1,00	1,50	1,20	<b>32,18</b>
	M-IN	56,65	0,50	<b>12,59</b>	<b>15,73</b>	<b>18,88</b>	1,00	1,50	1,20	<b>31,47</b>
	S-IN	54,96	0,50	<b>12,21</b>	<b>15,27</b>	<b>18,32</b>	1,00	1,50	1,20	<b>30,53</b>
<b>CORTE</b>	B-IN	9,65	0,50	<b>2,14</b>	<b>2,68</b>	<b>3,22</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,92</b>
	M-IN	8,59	0,50	<b>1,91</b>	<b>2,39</b>	<b>2,86</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,60</b>
	S-IN	8,41	0,50	<b>1,87</b>	<b>2,34</b>	<b>2,80</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,55</b>
	B-N	8,32	0,50	<b>1,85</b>	<b>2,31</b>	<b>2,77</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,52</b>
	M-N	7,84	0,50	<b>1,74</b>	<b>2,18</b>	<b>2,61</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,38</b>
	S-N	7,29	0,50	<b>1,62</b>	<b>2,03</b>	<b>2,43</b>	0,60	1,80	1,10	<b>2,21</b>
<b>TRACCIÓN</b>	B-IN	119,40	0,50	<b>26,53</b>	<b>33,17</b>	<b>39,80</b>	0,50	2,00	1,50	<b>19,90</b>
	M-IN	205,96	0,50	<b>45,77</b>	<b>57,21</b>	<b>68,65</b>	0,50	2,00	1,50	<b>34,33</b>
	S-IN	157,25	0,50	<b>34,95</b>	<b>43,68</b>	<b>52,42</b>	0,50	2,00	1,50	<b>26,21</b>
	B-N	62,13	0,50	<b>13,81</b>	<b>17,26</b>	<b>20,71</b>	0,50	2,00	1,50	<b>10,35</b>
	M-N	113,47	0,50	<b>25,22</b>	<b>31,52</b>	<b>37,82</b>	0,50	2,00	1,50	<b>18,91</b>
	S-N	95,32	0,50	<b>21,18</b>	<b>26,48</b>	<b>31,77</b>	0,50	2,00	1,50	<b>15,89</b>
<b>FLEXIÓN</b>	B	109,14	0,50	<b>24,25</b>	<b>30,32</b>	<b>36,38</b>	1,00	2,00	1,50	<b>36,38</b>
	M	103,60	0,50	<b>23,02</b>	<b>28,78</b>	<b>34,53</b>	1,00	2,00	1,50	<b>34,53</b>
	S	62,45	0,50	<b>13,88</b>	<b>17,35</b>	<b>20,82</b>	1,00	2,00	1,50	<b>20,82</b>

Finalmente, la Tabla 37 presenta los módulos de elasticidad (MOE) y módulos de rigidez (G) de los diferentes modos mecánicos analizados por sección del culmo, destacando así, los módulos promedios ( $MOE_{0.5}$  o  $G_{0.5}$ ), el cálculo de los módulos percentil 5 ( $MOE_{0.05}$  o  $G_{0.05}$ ), y los módulos mínimos ( $MOE_{min}$  o  $G_{min}$ ).

**Tabla 37**

*Módulos de elasticidad y de rigidez (MOE & G) para los respectivos modos mecánicos analizados en el D. asper bajo la NSR-10 (AIS, 2010)*

Referencia Normativa		NSR-10 (AIS,2010)		
Ensayo	Sección	Módulo promedio	Módulo percentil 5	Módulo mínimo
		(MPa) MOE <sub>0.5</sub> – G <sub>0.5</sub>	(MPa) MOE <sub>0.05</sub> – G <sub>0.05</sub>	(MPa) MOE <sub>mín</sub> – G <sub>mín</sub>
COMPRESIÓN	B-IN	41370,95	29713,23	29224,00
	M-IN	36686,21	23453,63	21095,50
	T-IN	29633,46	25065,20	23552,00
CORTE	B-IN	4841,38	4297,49	4196,20
	M-IN	3347,24	2964,07	2902,90
	T-IN	1630,59	1317,49	1271,65
	B-N	5414,84	4071,56	4063,35
	M-N	4051,98	3422,34	3405,35
	T-N	2391,28	2223,30	2222,10
TRACCIÓN	B-IN	10974,75	10707,00	10680,00
	M-IN	19039,40	18887,00	18880,00
	T-IN	15193,20	14851,80	14825,00
	B-N	12347,75	11492,65	11486,00
	M-N	21944,90	20668,70	20567,00
	T-N	18348,40	17600,45	17267,00
FLEXIÓN	B	25221,25	24039,72	24013,11
	M	20175,76	18812,31	18609,38
	T	17370,54	16560,83	16556,72

#### 4.3. Conclusiones

- Los modos mecánicos gobernantes son compresión y flexión, éstos presentan un amplio rango de ductilidad que varían entre el 15 y 20% en sus valores modulares; razones por las que se evaluarán dichos ensayos en el capítulo de modelamiento estructural con elementos finitos (FEM y FEA).
- La ductilidad del *D. asper* para los modos mecánicos de compresión y flexión presentan un comportamiento bastante aceptable, generando ventajas sobre otros biomateriales ya que las deformaciones unitarias obtenidas durante estos ensayos, corroboran que en todas las secciones hubo un reacomodamiento de fibras conforme la carga aumentaba, y por lo tanto,

la transición desde que sobrepasa el rango elástico hasta el punto de ruptura es considerablemente amplia, confirmando así, la categorización común de este material denominado como “el acero vegetal” (Cembellín, 2009).

- Analizando los modos mecánicos de corte y tracción en el *D. asper*, se puede aseverar que las probetas nodales destacan sobre las internodales a causa de su inherente característica morfológica (nudo), el cual provee estabilidad y rigidez a la estructura en el rango elástico bajo cargas de aplastamiento; por otra parte, esta misma característica provoca un punto sensible de falla ante esfuerzos de tensión (Rodríguez Hernández, 2017). La aplicación de estos ensayos contextualiza una gran importancia mecánica en el producto final de la investigación y verifica las capacidades de respuesta que tiene el biomaterial ante las fuerzas que actúan para deformarlo, permitiendo evaluar así su nivel de fragilidad como elemento estructural.
- Se concluye que tras el análisis de todos los modos mecánicos, particularmente en esta investigación, corte paralelo a la fibra presentó los resultados más bajos en magnitud en cuanto a flexibilidad y resistencia, razón por la cual se debe tener un control adecuado de la incidencia de esta propiedad mecánica en elementos estructurales.
- Como conclusión general, a través de los ensayos mecánicos realizados al *D. asper* se ha comprobado que la sección media es la más óptima para propósitos constructivos, porque garantiza un mejor comportamiento biomecánico promedio ante fuerzas externas con un amplio rango de deformaciones, en comparación con las secciones base y superior del culmo. En la sección media se logra equilibrar la rigidez con la flexibilidad del material,

haciéndolo un elemento resistente antes esfuerzos de flexocompresión, pero también elástico y dúctil por su reacomodamiento fibrovascular.

- Se ha establecido una comparación entre las propiedades mecánicas de las especies *Guadua Angustifolia Kunth* y *D. asper*, encontrándose que el MOE de compresión, flexión y tracción evaluado en esta última reporta valores 2,62; 1,66 y 2,64 veces mayores en magnitud, respectivamente, concluyendo que el *D. asper* es aproximadamente 2 veces más rígido, factor preocupante cuando de construcciones sismorresistentes se trata, sin embargo, esta virtud favorece cuando se elabora un elemento estructural compuesto (viga o columna), ya que una configuración conformada con *D. asper* puede cumplir con los mismos requerimientos estructurales con un menor número de culmos en su estructura, optimizando su comportamiento flexo-compresivo y su funcionalidad biomecánica al utilizar la sección media del culmo. Por otra parte el MOR de compresión, flexión y tracción evaluado en el *D. asper* presentó valores 1,80; 2,34 y 1,10 veces mayores respectivamente que la *Guadua Angustifolia Kunth*, esto corrobora la alta resistencia mecánica que posee la especie investigada, característica necesaria para reducir los esfuerzos generados por solicitaciones externas (Minke, 2012).
- Para una determinada muestra experimental se considera que la estimación de un CoV (i) hasta el 7% es precisa, (ii) entre el 8% y 14% significa que existe una precisión aceptable, (iii) entre el 15% y 20% es una precisión regular, y (iv) más del 20% indica que la estimación es poco precisa y por tanto, se recomienda utilizarla sólo con fines descriptivos o tendencias de aproximación (Martínez Rodríguez, 2005). En base a los rangos

presentados, los coeficientes de variación (CoV) en todos los modos mecánicos fue aceptable (0,10 en promedio) a causa de la dispersión en los datos, lo cual está dado por el tamaño de la población y la maquinaria empleada en la ejecución de ensayos. En las tablas de resultados de cada ensayo físico y mecánico se puede visualizar a detalle todos los CoV para cada parámetro de análisis.

- Las Tablas 38 y 39 presentan los esfuerzos admisibles y los módulos de elasticidad respectivamente del *D. asper* de esta investigación para la sección media (óptima-estructural), cuyos valores fueron calculados mediante los resultados mecánicos obtenidos en compresión, flexión, corte y tracción respaldados por las ecuaciones que proponen las normativas internacionales ISO 22156:2004 y NSR-10.

**Tabla 38**

*Esfuerzos admisibles de los modos mecánicos ensayados en la sección media nodal del D. asper*

ESFUERZOS ADMISIBLES, $\sigma_{adm-i}$ (MPa)					
<i>Dendrocalamus asper</i> , sección media nodal					
Normativa	Condición de carga	Compresión	Flexión	Corte	Tracción
		paralela	perpendicular		
		$\sigma_{adm-comp}$	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-corte}$	$\sigma_{adm-trac}$
NSR-10 (AIS,2010)	General	31,47	34,53	2,38	18,91
	Permanente (M)	12,59	23,02	1,74	25,22
ISO 22156:2004	Permanente + Temporal (M+V)	15,73	28,78	2,18	31,52
	Permanente + Temporal + Viento (M+V+W)	18,88	34,53	2,61	37,82

**Tabla 39**

*Módulos de elasticidad y de rigidez calculados para la sección media nodal del D. asper*

<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE) Y MÓDULO DE RIGIDEZ (G) en MPa</b>					
<i>Dendrocalamus asper</i> , sección media nodal					
Normativa	MOE, G	Compresión	Flexión	Corte	Tracción
		paralela	perpendicular		paralela
		$\sigma_{adm-comp}$	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-corte}$	$\sigma_{adm-trac}$
NSR-10 (AIS,2010)	Módulo promedio MOE <sub>0,5</sub> – G <sub>0,5</sub>	36686,21	20175,76	4051,98	21944,90
	Módulo percentil 5 MOE <sub>0,05</sub> – G <sub>0,05</sub>	23453,63	18812,31	3422,34	20668,70
	Módulo mínimo	21095,50	18609,38	3405,35	20567,00
	MOE <sub>mín</sub> – G <sub>mín</sub>				

- Se ha llegado a la conclusión que, sin minimizar la veracidad de los resultados obtenidos por la ISO 22156:2004, se decidió seleccionar para el análisis estructural de las viviendas propuestas en el capítulo VI, los valores de esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad que plantea la normativa NSR-10 ya que sus factores de compensación consideran diferencias entre las condiciones de ensayo en laboratorio y su posterior funcionalidad real bajo la aplicación de carga.

## CAPÍTULO V

### 5. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS MODOS MECÁNICOS DEL *DENDROCALAMUS ASPER*

#### 5.1. Introducción

El bambú (*D. asper*) es una gramínea autosostenible debido a su rápido crecimiento y sus características mecánicas extraordinarias; mediante el uso de este biomaterial se consigue dar solución a problemas de índole ambiental, económica y social (Londoño, 2011). En el presente estudio se hace énfasis en los usos estructurales que se le pueden dar al bambú en construcciones no convencionales, para esto se necesita determinar cuál es el rendimiento estructural del mismo fundamentado en su relación de forma – estructura – función.

Una vez determinadas las características del *D. asper* bajo los modos mecánicos de compresión, flexión, tracción y corte; es fundamental validar los datos experimentales en base a modelamiento matemático, pruebas in situ o modelación computacional; para este caso se optó por un modelo computacional que comprende dos fases, la primera será el desarrollo de modelos 3D de elementos finitos (3D FEM) ingresando parámetros como condiciones de borde, propiedades geométricas, elección de elementos adecuados, entre otras y la segunda será el análisis de elemento finitos que comprende la interpretación de los resultados obtenidos una vez que los modelos hayan sido ejecutados.

Se realizó un total de 18 modelos 3D de elementos finitos, para los modos mecánicos de compresión y flexión, dado que fueron los que presentaron mayores valores de resistencia. Estos

modelos se realizaron en base al estándar internacional ISO 22157-1 “Bambú – Determinación de las propiedades físicas y mecánicas”.

La modelación se complementó con análisis estáticos no lineales en los que se aplicó distintos tipos de carga para cada probeta y cada prueba específica, en todos los modelos se contempló parámetros como dirección de fibras, densidad, flexibilidad, propiedades geométricas y condiciones de borde; con el fin de estimar cuál es la influencia de estos parámetros en la respuesta mecánica del *D. asper* ante la aplicación de esfuerzos externos (compresión y flexión).

## **5.2. Materiales y métodos**

En las siguientes secciones se analiza la metodología utilizada para realizar los modelos de elementos finitos (FEM) y posteriormente efectuar su análisis con el fin de lograr el propósito de la investigación dentro de este capítulo.

### **5.2.1. Modelamiento de elementos finitos**

Dado el nivel progresivo de aplicación que ha tenido el bambú en los últimos años es necesario validar y compensar los resultados obtenidos en laboratorio para su posterior uso dentro de la industria de la construcción. Por lo tanto, se implementó el método de modelación de elementos finitos, siendo ésta una de las herramientas más empleadas en la solución de problemas de ingeniería; logrando obtener respuestas veraces para varios problemas de difícil solución mediante otros métodos (De Borst et al., 2012; Hughes, 2012; Zienkiewicz et al., 1977).

### **5.2.1.1. Detalles del modelo**

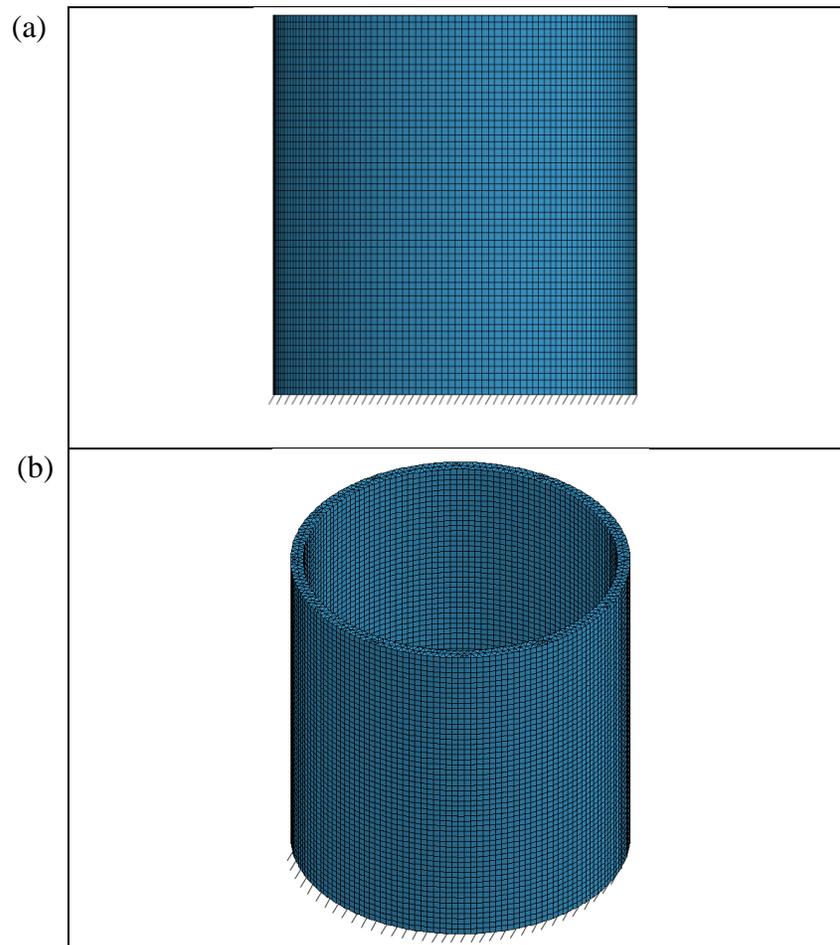
Los prototipos modelados para los modos mecánicos de compresión y flexión, han sido de gran utilidad al momento de estimar la probabilidad de daño que reciben los culmos de bambú cuando son sometidos ante esfuerzos externos. Por consiguiente, en el presente estudio, se desarrollaron 3D FEM de las probetas características para los ensayos de compresión y flexión, utilizando el software comercial de elementos finitos LS-Dyna.

Previo a la elaboración de modelos de elementos finitos es necesario establecer distintas suposiciones como (i) el material de las probetas será modelado con un comportamiento linealmente elástico, y (ii) no se presenta falla por rotura.

### **5.2.1.2. Condiciones de borde y propiedades geométricas**

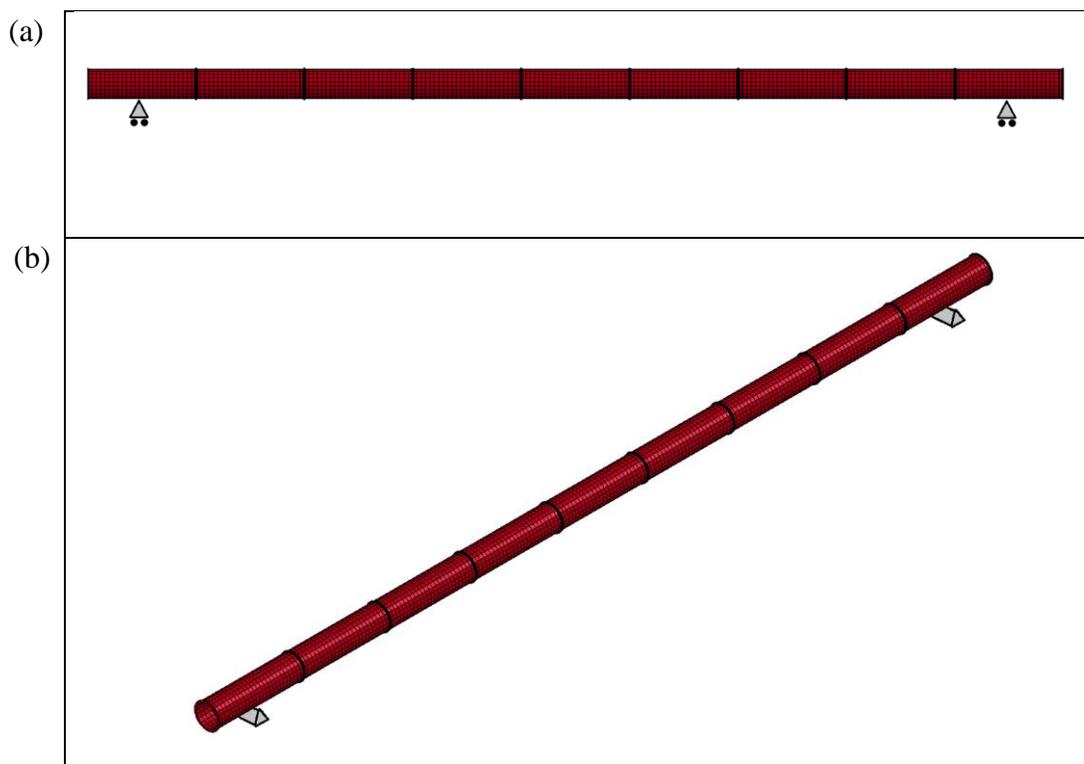
Para establecer las condiciones de borde del modelo de elementos finitos se debe considerar los parámetros utilizados en los ensayos de laboratorio tanto para el modo mecánico de compresión como para el de flexión.

El ensayo de compresión se realiza de manera que asemeje a una columna que trabaja a compresión pura, es decir, el desplazamiento de la base estará limitado y la carga será aplicada de manera progresiva en la superficie superior. El modelo de elementos finitos de compresión se fijó en su parte inferior (esto es, todos los nodos de la base están limitados al suelo, ver Figura 81), mientras se aplica carga axial progresiva de manera paralela a la dirección de las fibras de la probeta; por consiguiente, el sistema modelado para el modo mecánico de compresión tiene 1 grado de libertad.



**Figura 81.** Modelo de elementos finitos para el análisis bajo el modo mecánico de compresión (a) vista lateral y (b) vista isométrica

El ensayo de flexión se lleva a cabo de manera similar a una viga simplemente apoyada en 2 puntos (ver Figura 82), es decir se limita el desplazamiento y la rotación en todos los sentidos, excepto en la dirección paralela a la aplicación de carga. Por consiguiente, el modelo de elementos finitos de flexión se sitúa sobre 2 apoyos colocados equidistantemente desde el centro de la probeta; en consecuencia, el sistema modelado consta de 1 grado de libertad.



**Figura 82.** Modelo de elementos finitos para el análisis bajo el modo mecánico de flexión (a) vista lateral y (b) vista isométrica

Las propiedades geométricas de las probetas para los modos mecánicos de compresión y flexión se determinaron como un promedio de los datos de la Tabla 20 y la Tabla 24, respectivamente según los parámetros establecidos en el estándar internacional ISO 22157-1. En la elaboración de todos los modelos de elementos finitos se consideró la orientación de fibras de los culmos en dirección longitudinal (L).

#### **5.2.1.2.1. Propiedades físicas y mecánicas**

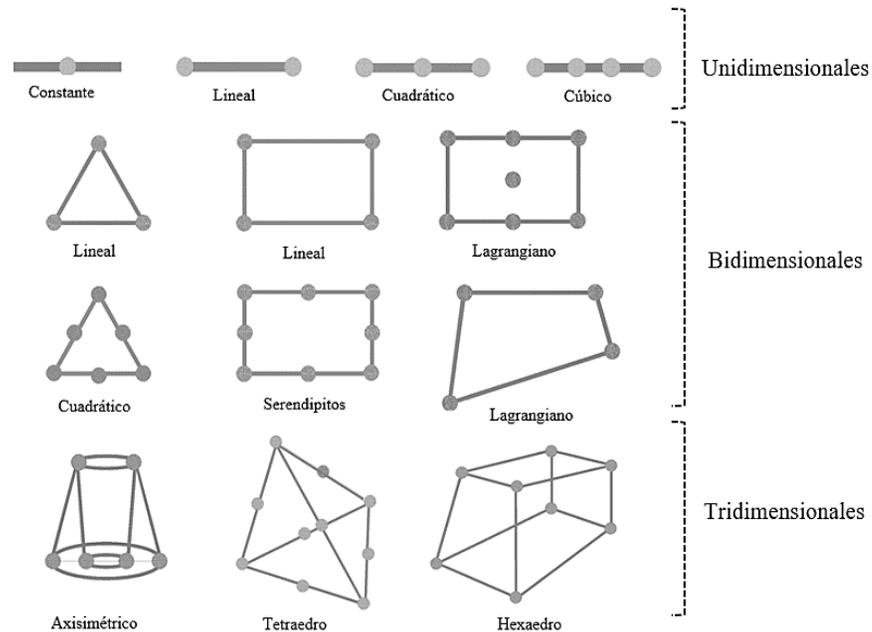
Las propiedades físicas y mecánicas necesarias para la elaboración de los modelos de elementos finitos (FEM) fueron seleccionadas de la Tabla 22 y Tabla 26 (compresión y flexión) enfocándose únicamente en la sección media. Las

propiedades físicas provinieron de los ensayos de densidad y contenido de humedad, mientras que las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad y módulo de ruptura, se derivaron de los resultados de los modos mecánicos de compresión, flexión, corte y tracción. Los coeficientes de Poisson de los tres planos de simetría (longitudinal, radial y tangencial) aplicados en los FEM fueron seleccionados de Akinlabi et al. (2017).

### **5.2.1.3. Técnica de modelamiento elementos finitos**

Para constituir la forma real del culmo de bambú se utilizó el programa Solid Works, en el cual se pudo detallar su compleja estructura, sobre todo sus nudos; este modelo se exportó al programa LS-Prepost, en el que se complementó colocando las condiciones de borde, las propiedades del material y las cargas actuantes. El FEM finalizado se ejecutó mediante el programa LS-Dyna el cual tomó resultados cada 0,01 segundos para su posterior presentación y evaluación.

El FEM se realizó en base a la técnica de modelado 3D FE (elementos tridimensionales enlazados a través de nodos) ya que presentó resultados fiables al evaluar los esfuerzos y desplazamientos producidos por las cargas actuantes. El FEM logró comprender el comportamiento ortotrópico y la configuración tubular de esta clase de gramínea, a través de elementos tetraédricos tridimensionales (esto es, elementos 3D de 10 nodos con diferentes propiedades para la dirección longitudinal, radial y tangencial) ver Figura 83.



**Figura 83.** Tipos de elementos finitos  
Adaptado de Manriquez (2002)

### 5.2.1.3.1. Discretización del modelo

Uno de los pasos cruciales para llegar a una solución real del problema es la discretización del FEM, es en este momento en el que se define el tamaño y la cantidad de elementos que tendrá el modelo (Benito Muñoz et al., 2008). La forma en que se generan “elementos finitos” es realizando una serie de divisiones en el modelo, estos se conectan a través de nodos generando una malla, la cual plasmará la geometría del FEM lo más apegado a la realidad (Manriquez, 2002). El número de divisiones y el tamaño de los elementos se probaron hasta obtener un mallado óptimo, que garantizó una transferencia de carga uniforme obteniendo así resultados fiables.

#### **5.2.1.3.2. Elección del tipo de elemento**

El tipo de elemento se debe seleccionar en función al problema a solucionar. Según Manriquez (2002) los elementos que pueden ser utilizados en los FEM se clasifican en (i) monodimensionales (líneas y vigas), (ii) bidimensionales (triangulares o rectangulares) y (iii) tridimensionales (asimétricos, hexaedros y paralelepípedos) visualizado gráficamente en la Figura 83.

Benito Muñoz et al. (2008) presenta la utilidad de cada tipo de elemento; (i) monodimensionales se usan para modelar cargas axiales; (ii) bidimensionales se utilizan para modelar vigas cortas y placas en el plano de acción de carga, y (iii) tridimensionales para modelar estructuras complejas y cargadas de manera simétrica o antisimétrica.

Para el caso de la presente investigación y con el fin de representar la geometría del modelo lo más real posible, se utilizó elementos tetraédricos 3D con 10 nodos, esta elección se realizó en base a que el culmo de bambú no es una estructura regular impidiendo el uso de elementos hexaédricos por cuestiones de isotropía geométrica, es decir, similitud a la geometría real del culmo.

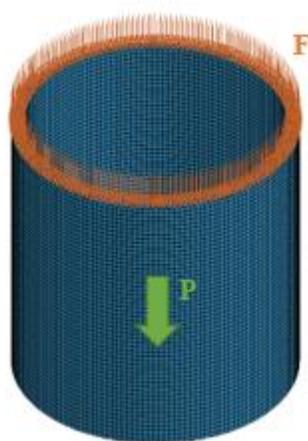
#### **5.2.1.4. Condiciones de carga**

Para el caso de la modelación de elementos finitos se denomina carga, a las fuerzas externas activas que se aplican sobre la estructura, esto es, aquellas que son capaces de provocar tensiones internas y cambio en la distancia entre puntos (Leiva y Omar, 2010). Los FEM se analizaron bajo dos condiciones de carga específicas (i) el

peso propio (P) de la estructura, y (ii) la carga característica (F) por modo mecánico (compresión y flexión).

#### 5.2.1.4.1. Compresión

El peso propio (P) actuante en los FEM para el modo mecánico de compresión se desarrolla en dirección de la gravedad, es decir, en sentido vertical sobre el modelo (ver Figura 84), mientras que la carga externa aplicada (F) se obtuvo como el valor promedio de fuerza máxima aplicada en los ensayos de laboratorio.

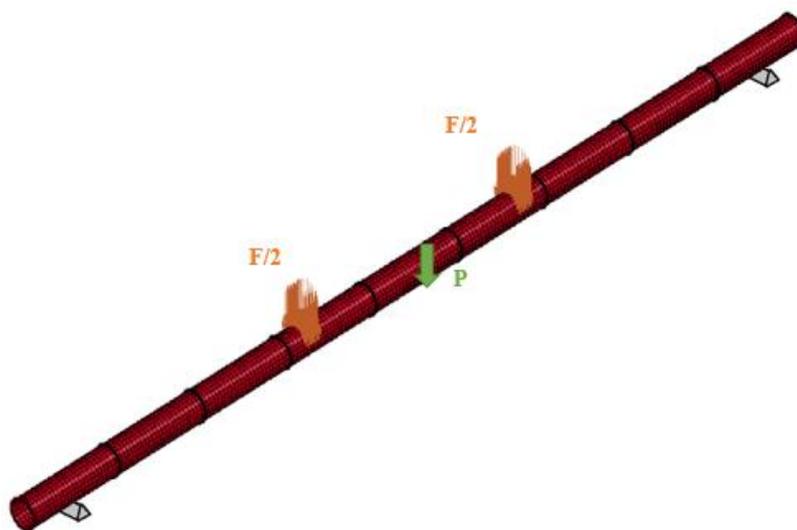


**Figura 84.** Condición de carga para los FEM del modo mecánico de compresión

Como se puede apreciar en la Figura 84 la carga externa aplicada es distribuida sobre el área superior del modelo, por el contrario, la carga de peso propio (P) actúa en cada elemento tetraédrico 3D del FEM, ya que el programa se encarga de asignar a cada elemento una masa, basándose en las características del material (ver Tabla 40).

#### 5.2.1.4.2. Flexión

Al igual que en el modo mecánico de compresión la carga de peso propio (P), para los FEM del modo mecánico de flexión, actúa en dirección de la gravedad; asimismo la carga actuante externa (F) se calculó como el promedio de fuerza máxima aplicada en los ensayos de laboratorio.



**Figura 85.** Condición de carga para los FEM del modo mecánico de flexión

La Figura 85 presenta gráficamente las cargas externas (F/2) aplicadas, mismas que se encuentran equidistantes desde el centro del modelo y se aplican en dirección perpendicular al eje longitudinal de la probeta (perpendicular a las fibras). El peso propio (P) de la estructura se aplica en el centro de cada elemento tetraédrico 3D en base a las características de la probeta (ver Tabla 40), este tipo de carga se puede interpretar como una carga concentrada en el centro de la estructura y aplicada en dirección de la gravedad.

**Tabla 40***Carga aplicada en los modelos de elementos finitos para cada modo mecánico*

<b>Ensayos</b>	<b>Carga externa (F) (N)</b>	<b>Densidad básica (<math>\delta_b</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Compresión	249338,06	641,22	0,30
Flexión	20536,79	686,04	0,30

**5.2.1.5. Método de medición de esfuerzos**

Las diferentes causas o circunstancias en que un material o un sistema estructural pueden fallar, reciben el nombre de criterios de falla (Manotas et al., 2008); entre los más comunes se encuentran las deformaciones excesivas, fisuras, falta de consistencia de materiales e incluso la rotura. La estimación del criterio de falla es esencial dentro del análisis de resistencia a esfuerzos de un material, en el caso del presente estudio únicamente se analizará la falla por rotura.

Debido a las propiedades mecánicas y a la composición estructural macroscópica del bambú (ortotrópico, esto es, comportamiento mecánico distinto en cada dirección) se empleó el criterio de falla 3D de Von Mises (Suntaxi Llumiquinga, 2014), el cual se utiliza como un indicador de diseño de materiales dúctiles, mediante la predicción de fallo elástico de materiales en base al aumento de la energía de distorsión aplicada. La Teoría de Von Mises suministró una confiable evaluación de la falla del material cuando era ensayado bajo los modos mecánicos de compresión y flexión. Por otra parte, la teoría de fallo 3D de Von Mises entregó resultados más congruentes para el análisis del bambú que otros criterios de falla presentes en el programa LS-Dyna como (i) el criterio de esfuerzos resultantes totales y (ii) el criterio de Tresca.

### **5.2.1.6. Modelo óptimo de convergencia**

Se realizó un total de 18 modelos de elementos finitos (FEM) para los modos mecánicos de compresión y flexión. La selección del modelo óptimo de convergencia para cada modo mecánico se realizó en función de 2 parámetros base: (i) relación de aspecto menor a 10 para cada elemento, y (ii) el tiempo de ejecución de cada modelo. A su vez, se identificaron 2 parámetros para determinar el punto de convergencia de cada tipo de modelos, (i) el esfuerzo máximo del modo mecánico respectivo, y (ii) el desplazamiento vertical máximo de cada FEM.

#### **5.2.1.6.1. Compresión**

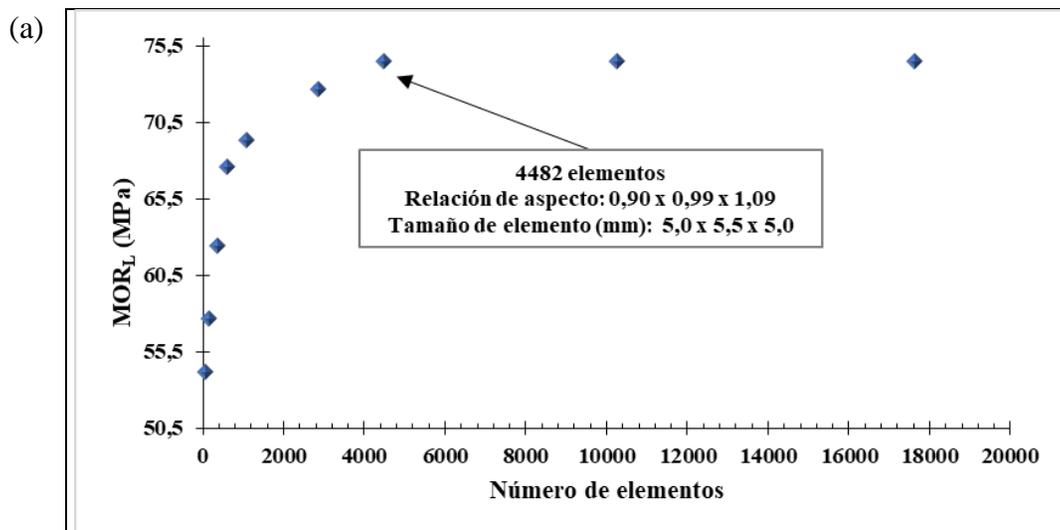
Para el modo mecánico de compresión se realizaron 9 FEM sometidos a una fuerza distribuida de 249338,06 N. La selección del modelo óptimo de convergencia para este modo mecánico se realizó en base a una relación de aspecto menor a 10 y a un tiempo de procesamiento menor a 12 h 8 min 3 s; adicionalmente se consideró (i) el esfuerzo máximo en dirección paralela a las fibras del culmo, y (ii) el desplazamiento producido por la fuerza aplicada (ver Tabla 41). La Figura 86 (a) y (b) muestra los resultados del módulo de ruptura a compresión ( $MOR_L$ ) y el desplazamiento máximo versus número de elementos tetraédricos totales, respectivamente.

**Tabla 41***Resultados del estudio de convergencia para el modo mecánico de compresión*

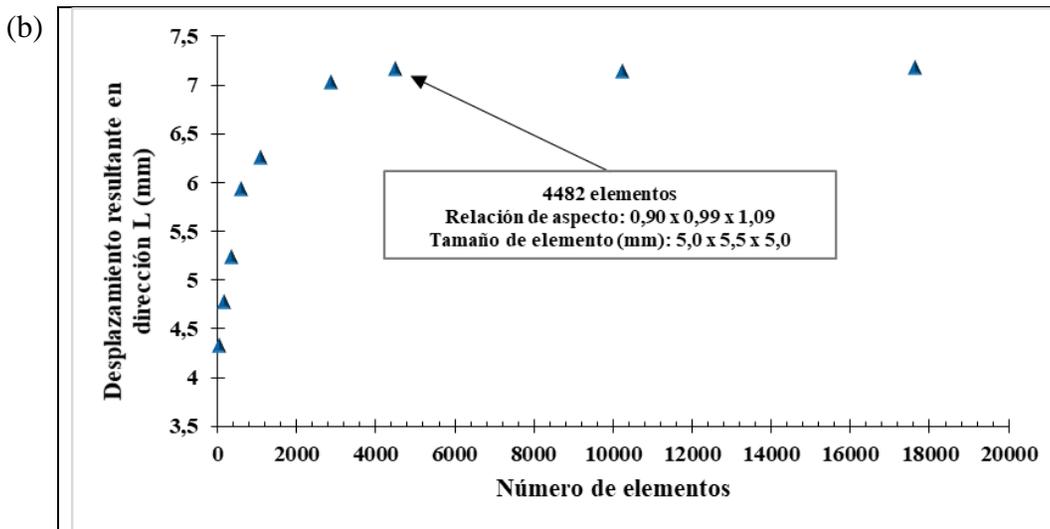
FEM No.	Elementos totales	Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	MOR <sub>L</sub> Von Mises (Palermo et al.)	Despl. Max. Resultado disp. (mm)
		(L) (mm)	(R) (mm)	(T) (mm)	L/R	L/T	R/T			
1	51	46,5	10,0	45,0	4,65	1,03	0,22	10 min 39 s	54,21	4,32
2	84	38,0	10,0	34,0	3,80	1,12	0,29	22 min 2 s	57,63	4,77
3	145	28,3	10,0	27,2	2,83	1,04	0,37	54 min 48 s	62,41	5,23
4	252	19,4	10,0	22,7	1,94	0,85	0,44	2 h 27 min 23 s	67,56	5,93
5	1079	9,9	10,0	10,5	0,99	0,95	0,96	4 h 42 min 56 s	71,82	6,25
6	1980	7,5	5,1	7,6	1,47	0,99	0,67	6 h 43 min 15 s	73,26	7,02
7	4482	5,0	5,5	5,0	0,90	0,99	1,09	12 h 8 min 3 s	74,51	7,16
8	37152	2,5	2,7	2,5	0,94	0,99	1,05	31 h 39 min 54 s	74,52	7,15
9	70365	1,0	1,0	1,0	0,99	0,99	1,00	48 h 17 min 36 s	74,52	7,15

\* Los resultados sombreados corresponden al modelo óptimo de convergencia.

\* (L), (R) y (T), son las direcciones longitudinal, radial y tangencial determinadas en el Capítulo 4.



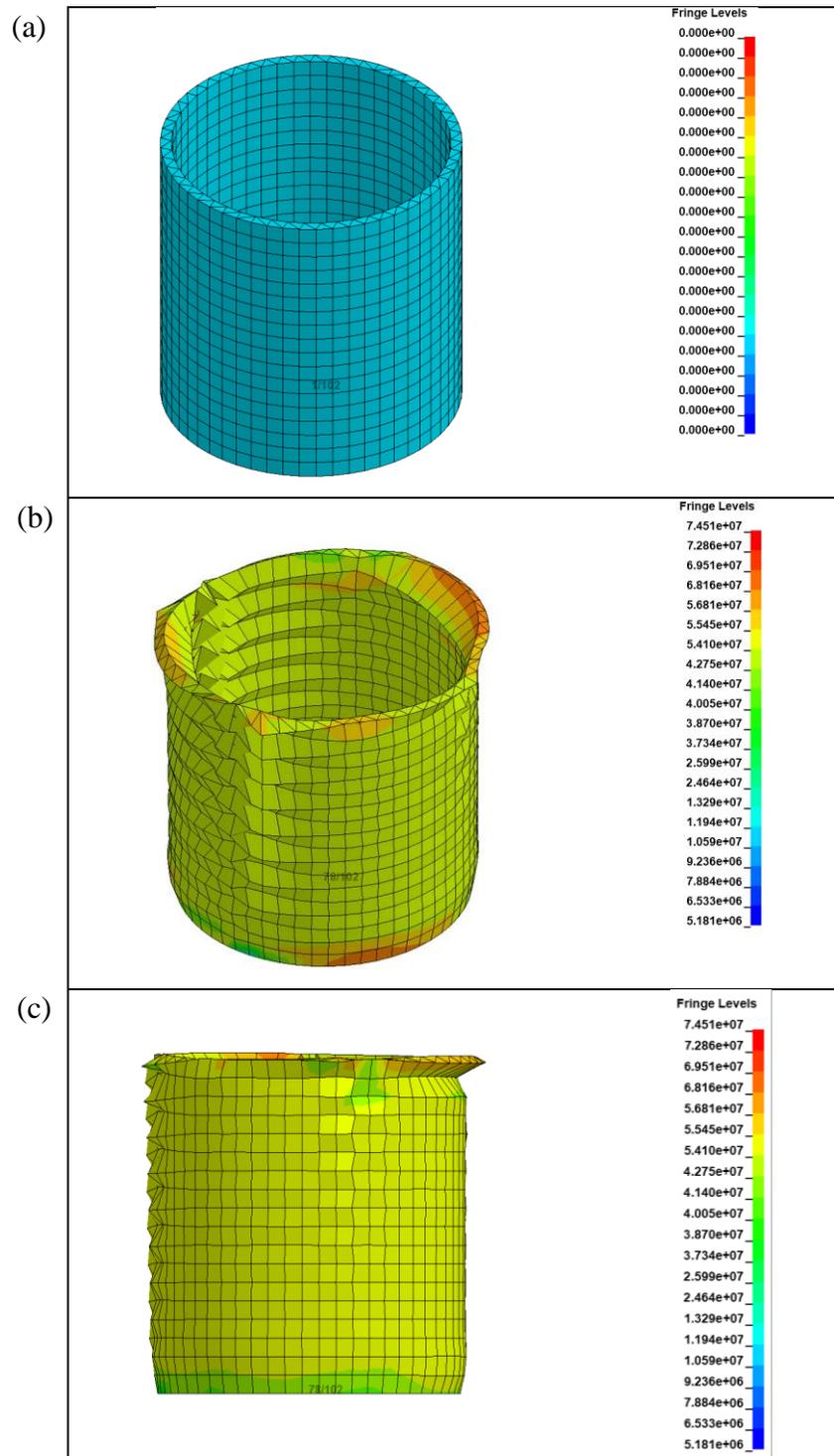
CONTINÚA →



**Figura 86.** Resultados del estudio de convergencia bajo el modo mecánico de compresión (a)  $MOR_L$  – número de elementos tetraédricos tridimensionales totales y (b) desplazamiento máximo resultante dirección longitudinal – número de elementos tetraédricos tridimensionales totales

Las Figura 86 (a) y (b) indican que los resultados empiezan a converger cuando el FEM comprendía 2864 elementos tetraédricos tridimensionales; pese a que este modelo presentó resultados razonables no se adoptó en esta investigación debido a que los resultados de desplazamiento para este número de elementos aun no convergían en su totalidad; por lo tanto, se seleccionó como modelo óptimo de convergencia al FEM # 7 que poseía 4482 elementos (consultar Tabla 41).

La Figura 87 (a), presenta el modelo óptimo de convergencia seleccionado con su respectivo análisis de elementos finitos (FEA), en el cual se evidencia que la concentración de esfuerzos de compresión (color rojo) se centra en la parte superior de la probeta de bambú con un valor máximo de 74,51 MPa [ver Figura 87 (b) y (c)]



**Figura 87.** FEM óptimo seleccionado para el modo mecánico de compresión (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) distribución de esfuerzos normales de la probeta (vista isométrica), y (c) distribución de esfuerzos normales (vista lateral)

### 5.2.1.6.2. Flexión

Para el caso del modo mecánico de flexión se desarrolló un total de 9 FEM sometidos ante una carga puntual simétrica de 20536,79 N. La identificación del modelo óptimo de convergencia de este modo mecánico se llevó a cabo en base a una relación de aspecto  $< 10$ , y a un tiempo de ejecución menor a 54 h 27 min 43 s; asimismo se consideró (i) el módulo de ruptura de flexión, y (ii) el desplazamiento producido en la parte central de la probeta de flexión una vez que se aplica la carga a flexión (ver Tabla 42). La Figura 88 muestra los resultados de (a) módulo de ruptura de flexión ( $MOR_R$ ) y (b) desplazamiento máximo, versus número de elementos tetraédricos totales.

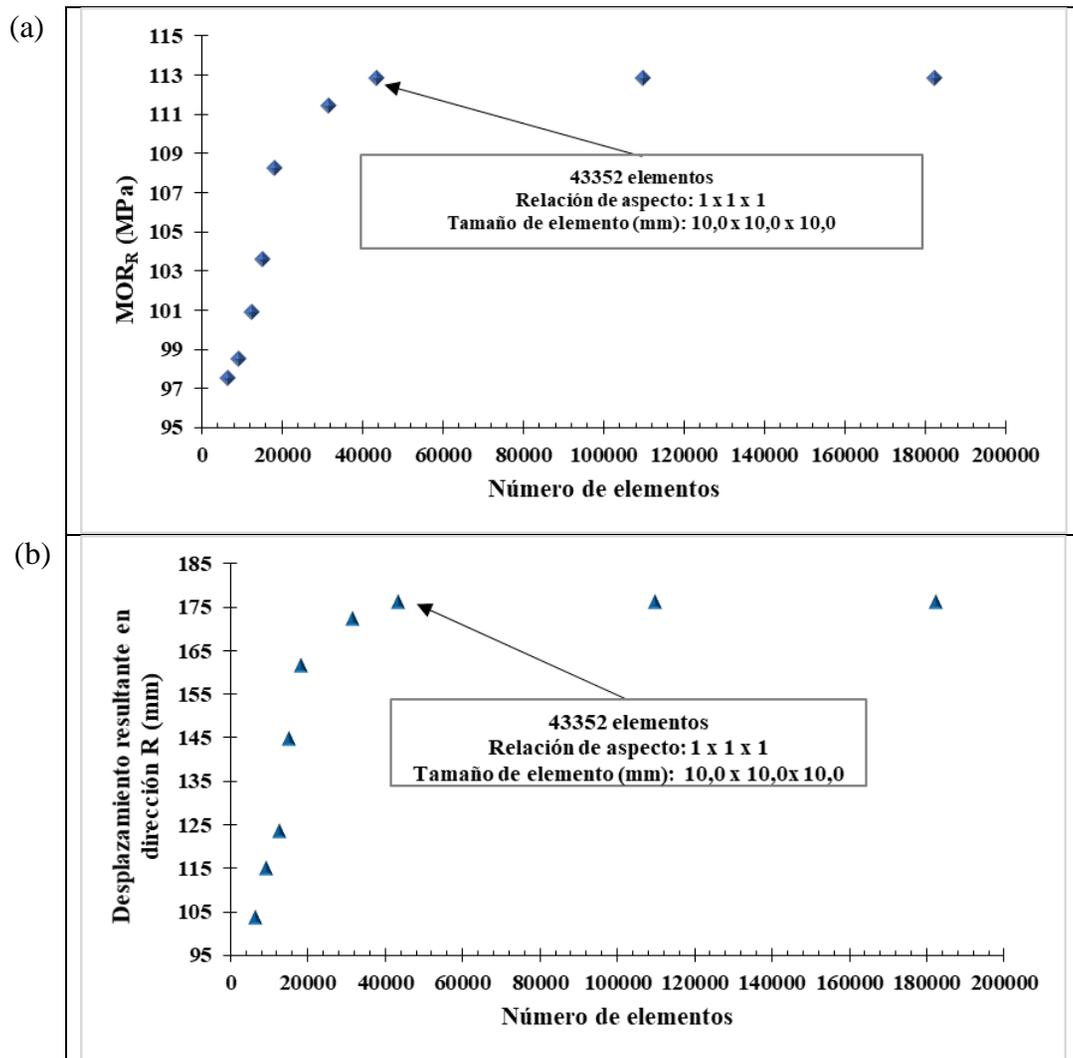
**Tabla 42**

*Resultados del estudio de convergencia para el modo mecánico de flexión*

FEM No.	Elementos totales	Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	$MOR_R$ Von Mises (Palermo et al.)	Despl. Max Resultado disp (mm)
		(L) (mm)	(R) (mm)	(T) (mm)	L/R	L/T	R/T			
1	3262	10,0	50,0	50,0	0,20	0,20	1,00	23 min 11 s	97,51	103,56
2	4413	10,0	34,8	37,7	0,29	0,26	0,92	44 min 2 s	98,53	114,97
3	6587	10,0	29,9	28,8	0,33	0,35	1,04	1 h 4 min 58 s	101,89	123,59
4	9066	10,0	23,5	23,3	0,43	0,43	1,01	1 h 57 min 19 s	103,57	144,61
5	12531	10,0	19,0	19,7	0,53	0,51	0,96	12 h 4 min 21 s	106,24	172,53
6	21532	10,0	14,8	15,0	0,67	0,67	0,99	18 h 4 min 29 s	111,46	175,41
7	43352	10,0	10,0	10,0	1,00	1,00	1,00	54 h 27 min 43 s	112,85	176,02
8	159761	10,0	5,0	5,0	2,00	2,00	1,00	158 h 59 min 4 s	112,86	176,09
9	602433	10,0	2,4	2,4	4,17	4,17	1,00	274 h 37 min 16 s	112,84	176,07

\* Los resultados sombreados corresponden al modelo óptimo de convergencia.

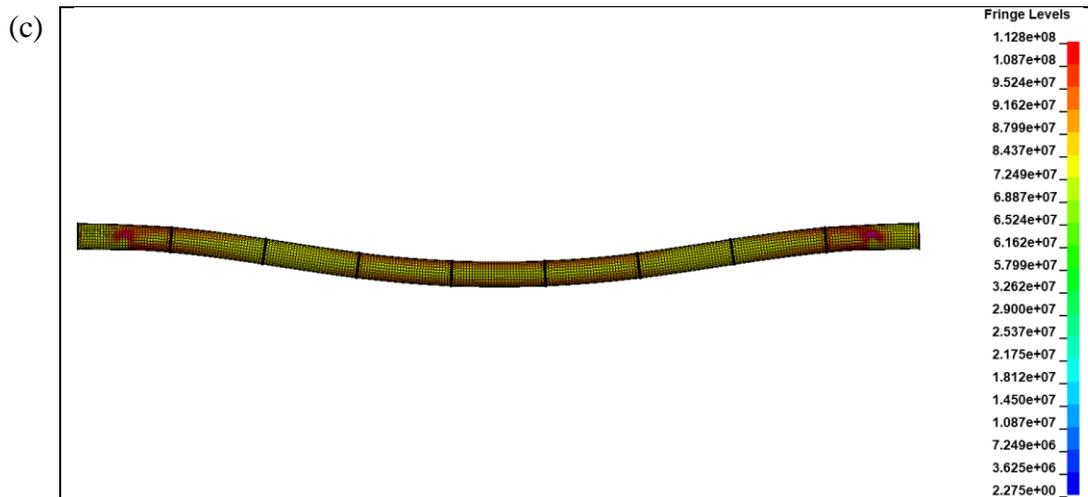
\* (L), (R) y (T), son las direcciones longitudinal, radial y tangencial determinadas en el Capítulo 4.



**Figura 88.** Resultados de estudio de convergencia bajo el modo mecánico de flexión, (a) MOR<sub>R</sub> – número de elementos tetraédricos tridimensionales y (b) desplazamiento máximo resultante dirección radial – número de elementos tetraédricos tridimensionales

Las Figura 88 (a) y (b) indican que los resultados comienzan a converger cuando el FEM comprendía 31532 elementos tetraédricos tridimensionales; sin embargo, no se adoptó este modelo en el presente estudio debido a que los resultados de desplazamiento para este número de elementos aun no convergían en su totalidad; por lo tanto, se seleccionó como modelo óptimo de convergencia al FEM # 7 que poseía 43352 elementos (consultar Tabla 42).





**Figura 89.** FEM óptimo seleccionado para el modo mecánico de flexión (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) distribución de esfuerzos normales de la probeta (vista isométrica), y (c) distribución de esfuerzos normales (vista lateral)

## 5.2.2. Análisis de elementos finitos

Se realizó 18 análisis de elementos finitos (FEA), en los cuales se evaluó el comportamiento mecánico y el tipo de falla del material cuando la carga era aplicada. En la presente sección se evaluará las consecuencias de la aplicación de carga en probetas de bambú (*D. asper*), en términos de progresión de falla del material y esfuerzos resultantes.

### 5.2.2.1. Biomecánica del bambú (*D. asper*)

Esta sección analiza cuál es el efecto producido por las cargas actuantes, en el comportamiento mecánico del material y consecuentemente en el desarrollo del tipo de falla de cada modo mecánico. El estudio de estos parámetros se fundamentó en el análisis no lineal de elementos finitos, en el cual se aplicó distintos tipos de carga, es decir, para el modo mecánico de compresión la carga fue proporcionalmente distribuida

en el área de aplicación, mientras que la carga para el modo mecánico de flexión se aplicó de manera puntual en dos partes del FEM.

Además, se analizó la evolución de falla del FEM distinguiendo de manera específica cuál es el lugar de mayor concentración de esfuerzos y por consiguiente donde inicia el desarrollo de la falla.

### **5.2.3. Eficiencia mecánica del bambú**

El bambú es uno de los biomateriales más demandados a nivel mundial debido a su excepcional eficiencia mecánica (elevado comportamiento mecánico por unidad mínima de masa). Históricamente el bambú ha sido seleccionado para liderar proyectos con aplicaciones técnicas novedosas debido a su gran versatilidad y alto rendimiento (Wegst, 2011). En los últimos años el sector ingenieril ha explotado mucho más este material en aplicaciones (elementos estructurales, pisos, y paredes) que tradicionalmente se realizarían con materiales convencionales (acero, concreto, ladrillo y bloque).

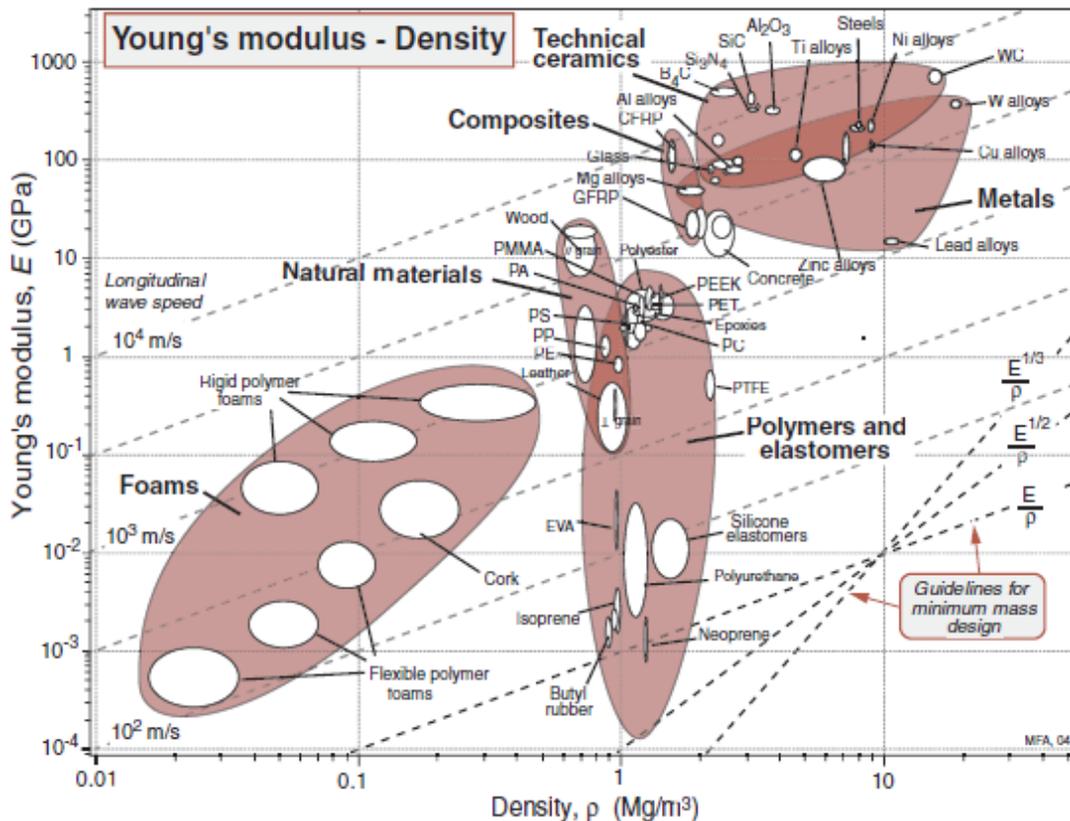
Desde el punto de vista de mecánica-estructural se puede considerar que los culmos de bambú predominantemente trabajan como una viga sujeta a momentos de flexión, provocados por su peso y determinadas acciones externas (Speck y Burgert, 2011). La eficiencia mecánica que presenta el bambú se debe específicamente a tres factores de forma (i) su estructura microscópica, (ii) su estructura macroscópica y (iii) su gradiente de densidad (Wegst y Ashby, 2004); relacionando estas características se logra obtener un material con altos valores de índice de comportamiento (PI).

Para una viga con una determinada longitud, rigidez, y sección transversal dada, el material con mayor eficiencia mecánica será aquel que tenga un mayor índice de comportamiento (PI), valor que se calculó en base a la Ecuación (16) dada por Wegst y Ashby (2004),

$$PI_1 = \frac{MOE^{\frac{1}{2}}}{\delta_b} \quad (16)$$

donde,  $PI_1$  es el índice de comportamiento mecánico en términos de resistencia a deflexiones ante la aplicación de carga,  $MOE$  es el módulo de elasticidad del material del modo mecánico gobernante en (GPa) y  $\delta_b$  es la densidad básica en ( $Mg/m^3$ ).

Ashby (1995) presenta la Figura 90 en la cual ubica contornos cerrados de clasificación de distintos materiales de ingeniería en base a su MOE y su densidad básica. De igual manera presenta líneas guía para las diferentes constantes de eficiencia mecánica, específicamente en este estudio se utilizará la correspondiente a  $\frac{MOE^{\frac{1}{2}}}{\delta_b}$ . La Figura 90 será utilizada para la futura comparación de las características obtenidas con bambú versus las de distintos materiales convencionales de ingeniería.



**Figura 90.** Propiedades de distintos tipos de materiales, MOE en (GPa) versus la densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ). Las líneas guía identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos

Fuente: Ashby (1995)

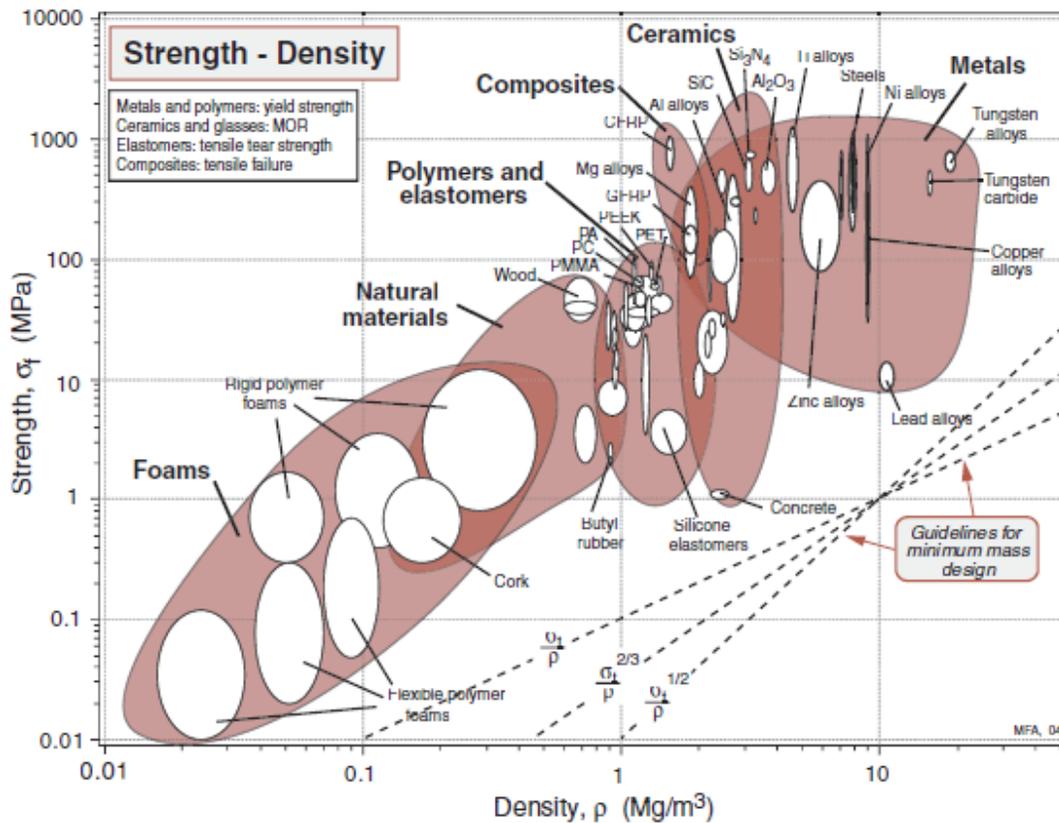
La eficiencia mecánica también puede calcularse en términos de resistencia a la propagación de esfuerzos, mediante el índice de comportamiento ( $PI_2$ ), calculado en base a la Ecuación (17) dada por Wegst y Ashby (2004),

$$PI_2 = \frac{MOR^{\frac{2}{3}}}{\delta_b} \quad (17)$$

donde,  $PI_2$  es el índice de comportamiento mecánico en términos de resistencia a esfuerzos,  $MOR$  es el módulo de ruptura del material del modo mecánico gobernante en (GPa) y  $\delta_b$  es la densidad básica en ( $\text{Mg/m}^3$ ).

La Figura 91 presentada por Ashby (1995) clasifica a distintos materiales de ingeniería en contornos cerrados, basados en su MOR y su densidad básica. Asimismo, presenta líneas guía para las diferentes constantes de eficiencia mecánica, particularmente en esta investigación

$\frac{MOR^2}{\rho_b}$ . La Figura 91 será utilizada para la posterior comparación de las propiedades físico-mecánicas obtenidas del bambú (*D. asper*) versus las de distintos materiales convencionales de ingeniería aquí presentados.



**Figura 91.** Propiedades de distintos tipos de materiales, MOR (Palermo et al., 2005) versus la densidad ( $Mg/m^3$ ). Las líneas guía identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos

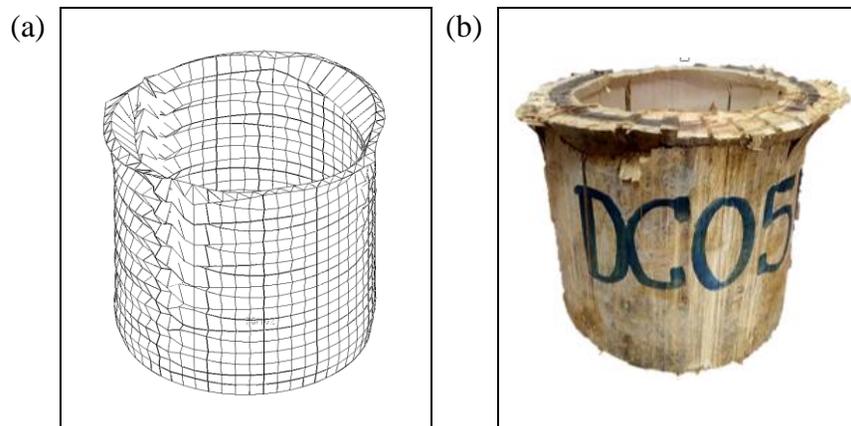
Fuente: Ashby (1995)

### 5.3. Resultados

#### 5.3.1. Biomecánica del culmo de *D. asper* bajo esfuerzos de compresión

Mediante el respectivo FEA para el modo mecánico de compresión se pudo corroborar que, al incrementar progresivamente la magnitud de la carga aplicada el biomaterial refleja mayor esfuerzo y más cuando llega a su módulo de ruptura el material empieza a fracturarse y su capacidad de resistencia disminuye paulatinamente.

Por otro lado, se puede observar que la concentración de esfuerzos generalmente se sitúa en la parte media y en los extremos de la probeta, produciendo una falla combinada [ejemplarizada en la Figura 92 (a) y (b)], que se debe al aplastamiento de la misma.

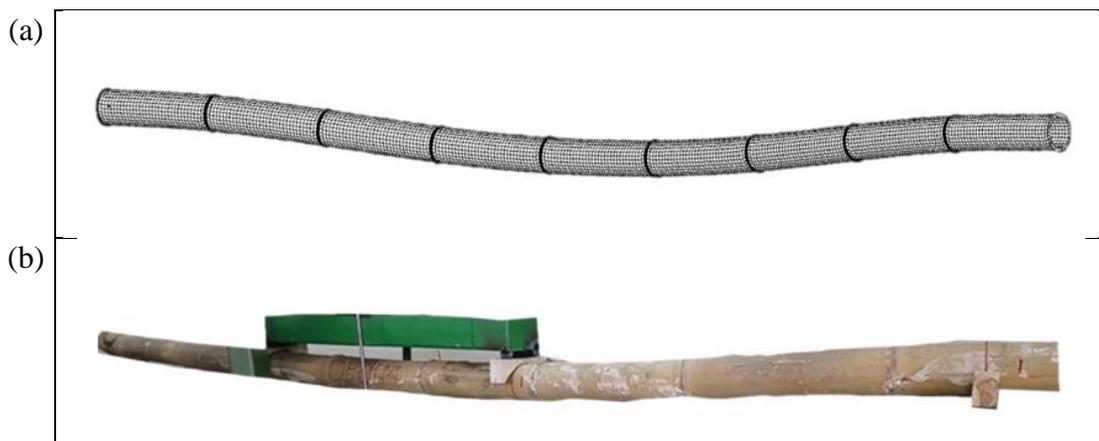


**Figura 92.** Falla por delaminación parcial y pandeo general de las fibras (a) modelamiento en elementos finitos, y (b) probeta ensayada en laboratorio (DC05M)

#### 5.3.2. Biomecánica del culmo de *D. asper* bajo esfuerzos de flexión

El FEA desarrollado para el modo mecánico de flexión destacó el comportamiento dúctil del bambú y mostró que la máxima concentración de esfuerzos se desarrolla en los nudos del culmo, siendo las más cercanas a la aplicación de la carga más afectada. Además, se pudo constatar que la falla se presenta por tensión residual, es decir que al aplicar una carga de

flexión simétrica los esfuerzos son distribuidos proporcionalmente hacia los nudos, ocasionando que trabajen a tracción y estas a su vez provoquen el desprendimiento de las fibras de bambú y la evolución de fisuras. Cabe recalcar que durante el lapso de tiempo de aplicación de carga las probetas no presentaron falla total sino más bien trabajaron en el rango plástico del material (ductilidad), obteniendo como resultado una fractura lineal por fatiga uniforme y desgarramiento fibrovascular (ejemplarizado en la Figura 93).



**Figura 93.** Fractura lineal por fatiga uniforme y desgarramiento fibrovascular (a) modelamiento en elementos finitos, y (b) probeta ensayada en laboratorio (DF01M)

### 5.3.2.1. Factores de compensación

Una vez que se ha realizado el análisis de elementos finitos (FEA) para cada modo mecánico y se ha establecido el modelo óptimo de convergencia respectivo, se evalúa la determinación de un factor de compensación que se aplicará a los resultados obtenidos en laboratorio, esto con el fin de conseguir resultados reales y validados de forma computacional y experimental. La obtención de un factor de compensación es necesario debido a agentes no controlados que pueden incidir al momento de realizar los ensayos de laboratorio, tal es el caso de efectos de fricción entre la máquina y la

probeta, la mala calibración de equipos de medición, la transferencia no uniforme de cargas, la falta de acoples y máquinas destinadas para ensayos específicos; la Ecuación (18) se plantea para obtener el factor de compensación,

$$FC = \frac{\text{Valor de esfuerzo (FEA)}}{\text{Valor de esfuerzo determinado en laboratorio}} \quad (18)$$

La Tabla 43 presenta los resultados de compensación para cada modo mecánico (compresión y flexión), calculados en base a los resultados obtenidos del FEA y los ensayos de laboratorio respectivos.

**Tabla 43**

*Factores de compensación calculados para los prototipos en investigación*

<b>Modo mecánico</b>	<b>Prototipo</b>	<b>MOR experimental (Palermo et al.)</b>	<b>MOR FEA (Palermo et al.)</b>	<b>Factor de compensación</b>	<b>MOR ajustado (Palermo et al.)</b>
Compresión	M-IN	68,07	74,51	1,09	74,20
Flexión	M	107,54	112,85	1,05	112,92

Asimismo, la Tabla 43 presenta el valor ajustado de módulo de ruptura para compresión y flexión, siendo 74,20 MPa y 112,92 MPa, respectivamente. Estos datos serán utilizados para la posterior determinación de eficiencia mecánica.

Los factores de corrección son aceptables ya que según el porcentaje admisible en investigaciones experimentales no debe superar el 10%; estos factores compensan los errores en laboratorio que pudieron ocurrir durante la manipulación de equipos de ensayo, aditamentos o toma de resultados. El valor del 9% en compresión versus el 5% en flexión es lógico, debido a que el análisis de deformación del primero fue mediante deformaciones unitarias en valores relativamente menores (desplazamientos de 3 a 4 cm); mientras que en flexión las deformaciones se adquirieron directamente del desplazamiento de ensayo (de 12 a 14 cm), valores que son de evaluación inmediata.

### 5.3.3. Eficiencia mecánica

Para realizar el cálculo de la eficiencia mecánica del bambú se debe determinar cuál es su modo mecánico gobernante, específicamente para esta investigación el modo mecánico de flexión presentó altos valores de MOR (107,54 MPa) y MOE (20175,76 MPa), además se escogió este modo mecánico debido a la alta ductilidad que presentó el material cuando se le aplicó cargas de flexión. Por lo tanto, los datos para el cálculo de los índices de comportamiento ( $PI_1$  y  $PI_2$ ), se presentan en la Tabla 44.

**Tabla 44**

*Datos para el cálculo de eficiencia mecánica*

Propiedad	Valor	Unidad
MOE	20,176	GPa
MOR	112,920	MPa
$\delta_b$	0,686	Mg/m <sup>3</sup>

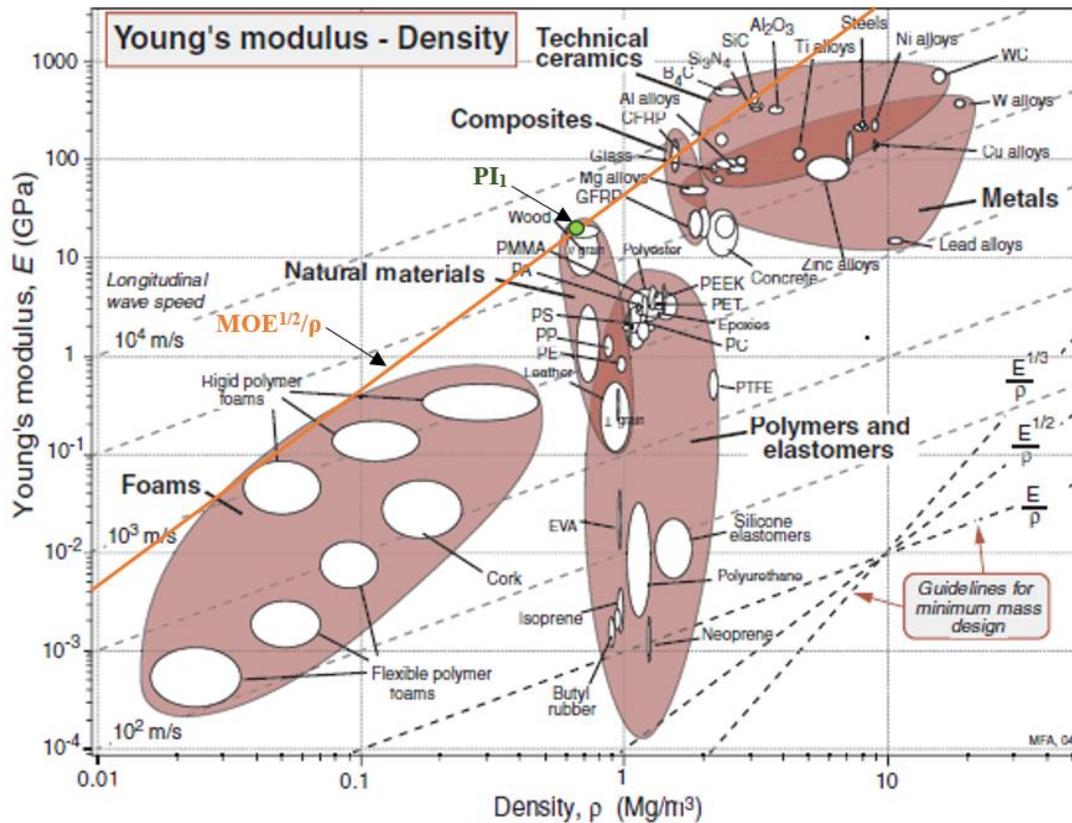
En base a los datos presentados en la Tabla 45, se utilizó las Ecuaciones (16) y (17) para determinar los índices de comportamiento  $PI_1$  y  $PI_2$ , respectivamente. Los resultados para cada índice de comportamiento se presentan en la Tabla 45.

**Tabla 45**

*Resultados de eficiencia mecánica para probetas de D. asper*

Índice de comportamiento	Valor	Unidad
$PI_1$	6,55	GPa <sup>1/2</sup> m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup>
$PI_2$	34,05	MPa <sup>2/3</sup> m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup>

El resultado de eficiencia mecánica ( $PI_1$ ) en términos de resistencia a deflexiones fue de 6,55 GPa<sup>1/2</sup>m<sup>3</sup>Mg<sup>-1</sup>. Este valor se graficó en la Figura 94 en base a los datos presentados en la Tabla 44.

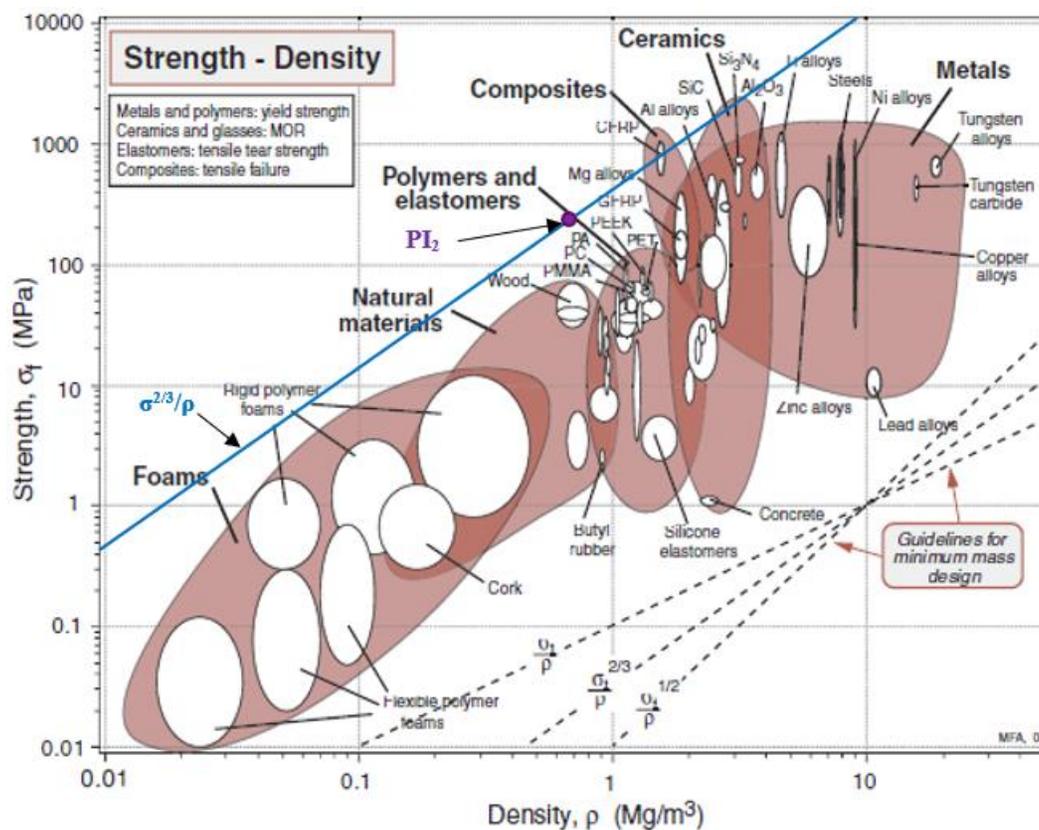


**Figura 94.** Ubicación del índice de comportamiento ( $PI_1$ ) en la gráfica de MOE (GPa) versus la densidad básica ( $Mg/m^3$ )  
Adaptado de Ashby (1995)

En la Figura 94 se muestra que el valor de eficiencia mecánica ( $PI_1$ ) del bambú (*D. asper*) es superior a todos los metales, espumas, polímeros y elastómeros. Adicionalmente se puede apreciar que es comparable con ciertos materiales naturales, materiales compuestos y materiales técnico cerámicos (Ashby, 1995). Tal es el caso de que el valor de eficiencia mecánica ( $PI_1$ ) perteneciente al bambú (*D. asper*), sea 3,57 veces mayor al acero ( $PI_1=1,84 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 2,80 veces mayor al concreto ( $PI_1=2,34 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 2,39 veces mayor al ladrillo ( $PI_1=2,74 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 2,04 veces mayor al aluminio ( $PI_1=3,21 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 1,60 veces mayor a la roca ( $PI_1=4,09 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ) y 1,27 veces mayor a la madera ( $PI_1=5,15 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ). Adicionalmente se puede comprobar que los resultados de eficiencia mecánica ( $PI_1$ ) del bambú

(*D. asper*) son comparables con uno de los mejores materiales de ingeniería [CFRP, Carbon Fiber-Reinforced Polymer ( $PI_1=6,75 \text{ GPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ )]. Por consiguiente, se puede deducir que el (*D. asper*) puede ser utilizado como material estructural debido a su gran capacidad para resistir deflexiones ante la aplicación de cargas externas.

Por otra parte, los resultados de eficiencia mecánica ( $PI_2$ ) en términos de resistencia a esfuerzos del bambú fue de  $34,05 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ . Este resultado se ploteó en la Figura 95 en base a los datos presentados en la Tabla 44.



**Figura 95.** Ubicación del índice de comportamiento ( $PI_2$ ) en la gráfica de módulo de ruptura (Palermo et al., 2005) versus la densidad (Mg/m<sup>3</sup>)

Adaptado de Ashby (1995)

En la Figura 95 se ubicó el valor de eficiencia mecánica ( $PI_2$ ) y se trazó la línea guía en base a este resultado, identificando que el bambú (*D. asper*) es superior en términos de resistencia a esfuerzos a todas las espumas, materiales naturales, metales, polímeros y elastómeros (Ashby, 1995). Por consiguiente, el *D. asper* es 6,37 veces mayor al concreto ( $PI_2=5,35 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 3,47 veces mayor a la roca ( $PI_2=9,80 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 3,27 veces mayor al ladrillo ( $PI_2=10,41 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 3,16 veces mayor al acero ( $PI_2=10,77 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ), 2,23 veces mayor al aluminio ( $PI_2=15,28 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ) y 1,76 veces mayor a la madera ( $PI_2=19,39 \text{ MPa}^{2/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ ).

En la presente investigación los resultados de eficiencia mecánica ( $PI_1$  y  $PI_2$ ) son altos, esto se debe a la composición ortotrópica y a la distribución de fibras del bambú. Además, estas características se complementan con una densidad básica menor a la de la mayoría de los materiales tradicionales de construcción (acero y concreto). En consecuencia, se puede determinar que el bambú (*D. asper*) es un material apto para ser utilizado como material estructural en proyectos de construcción (edificaciones, galpones, muros y materiales compuestos).

## CAPÍTULO VI

### 6. PROCESO CONSTRUCTIVO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE VIVIENDAS NO CONVENCIONALES CON *DENDROCALAMUS ASPER*

#### 6.1. Introducción

La aplicación de materiales y tecnologías no convencionales se ha convertido en una necesidad urgente para proteger el medio ambiente, desarrollando un enfoque sostenible para la industria de la construcción. Siguiendo esta línea, los materiales orgánicos naturales como el bambú tienen una destacada función en el afán por aliviar los problemas de infraestructura en los países subdesarrollados. Su enfoque de utilización genera discusión por sus ventajosas cualidades con el mínimo consumo energético y una reducida polución medioambiental, situación que no sucede con los materiales convencionales de construcción (ver Tabla 46), marcando una amplia diferencia que catapulta a este biomaterial como una solución inmediata para desarrollar elementos estructurales técnicamente seguros y ecológicos.

**Tabla 46**

*Energía de producción y polución liberada por elementos tradicionales de la construcción.*

Material	Energía para producción MJ/kg	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Carbono liberado kgCO <sub>2</sub> /kg
Cemento	4,6	1800	0,83
Hormigón armado 2% de cuantía	1,64	2500	0,241
Acero	35	7861	2,75
Aluminio Comercial	155	2750	8,24
Vidrio	15	2500	0,85
PVC	77,2	1200	2,41
Madera general	8,5	480-780	0,74
Madera tablero contrachapado/contraplacado	15	540-700	1,07
Bambú	0,5	600-750	0,034

Resumido de Hammond y Jones (2008); Janssen (1981); Rea Lozano (2012); Villanueva et al. (2014)

El uso del bambú en la construcción conduce hacia un ahorro considerable de energía, además de conservar los escasos recursos del mundo y minimizar el grado de contaminación ambiental. En una investigación sobre construcción con cañas vegetales en el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart, Frei Otto destacó que todas estas poseen una alta capacidad de resistencia ante esfuerzos mecánicos y un comportamiento similar en cuanto a la capacidad de carga. Entre todas las cañas vegetales se concluyó que, el bambú es el mejor en tamaño, ligereza y resistencia (Hensel et al., 2013).

Estas claras ventajas han atraído a investigadores de todo el mundo, no sólo de aquellos países donde el bambú tiene una larga historia de utilización, sino también de los países industrialmente desarrollados donde el bambú no crece originalmente. En vista de este contexto los autores de esta investigación, implementarán una de las especies de la familia *Bambusoideae* (*D. asper*) en la aplicación de propuestas habitacionales seguras, eficientes y respetuosas con el medio ambiente, siguiendo los lineamientos expresados por normativas nacionales e internacionales.

## **6.2. Técnicas constructivas**

### **6.2.1. Cimentaciones**

La construcción de cimentaciones de bambú se caracteriza por ser un enfoque estructural similar al que se aplica en la construcción de estructuras de madera. En este caso, los elementos de suelo, pared y techo están interconectados y a menudo uno depende del otro para la estabilidad general. Un adecuado sistema constructivo desde la fundación permite controlar los esfuerzos y las deformaciones laterales generadas en algunas formas tradicionales

de construcción. La adecuación e idoneidad de la estructura también dependerá en gran medida del buen nivel técnico de construcción al que sean sometidos sus elementos (Xiao et al., 2008).

El INBAR (2015), manifiesta que para este tipo de construcciones no convencionales se debe aplicar una investigación mínima del sector, cuyos análisis comprenden:

- i. Verificar las estructuras colindantes para constatar la presencia de asentamientos diferenciales, pérdida de la verticalidad, problemas de expansión y compresibilidad del terreno incluyendo daños o agrietamientos.
- ii. Detectar en las inmediaciones presencia de rellenos, actividad minera, zonas de alta erosión o cuerpos de agua que puedan afectar la funcionalidad y estabilidad de las casas.
- iii. Realizar como mínimo una calicata por cada 300 m<sup>2</sup> de construcción o por cada tres unidades de vivienda, que mantengan una profundidad de al menos 2 m, determinando de esta manera el tipo de suelo de fundación.

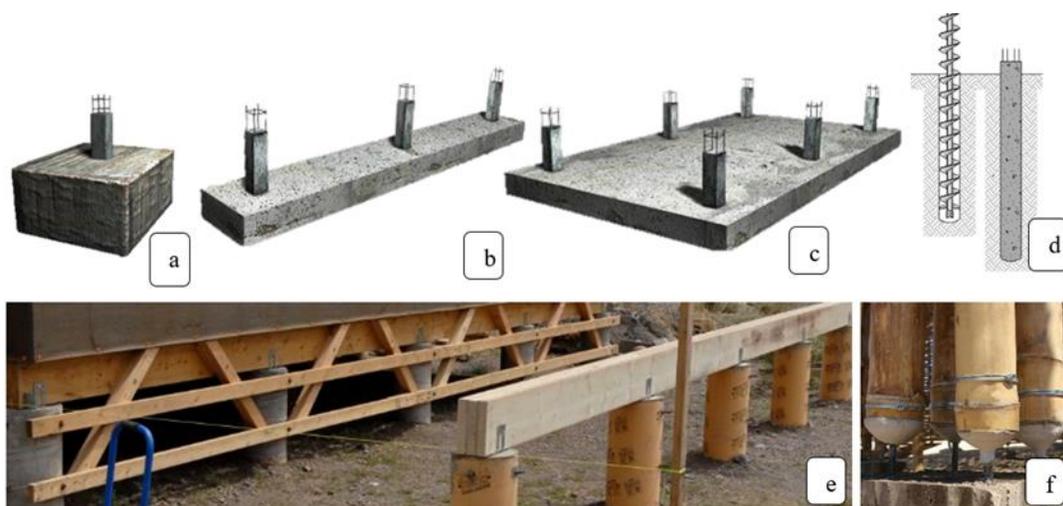
Si los datos recolectados manifiestan condiciones no idóneas para la construcción, se establecerá un análisis geotécnico pormenorizado del terreno para implementar medidas de corrección como: mejoramientos, sustituciones o definitivamente calificar a la zona como sitio constructivo no apto (INBAR, 2015).

#### **6.2.1.1. Sistemas de Cimentación**

La cimentación para una vivienda de caña de bambú posee las mismas características que las de una vivienda tradicional de hormigón, las cuales diseñadas con la técnica apropiada ayudan a prevenir significativamente el potencial daño provocado por fuerzas externas. Los sistemas de cimentaciones se realizan a través de

vigas perimetrales o muros continuos, zapatas aisladas o corridas, losas de cimentación y mediante pilotes hincados sobre la superficie (ver Figura 96); cada una de ellas determinada de acuerdo a la capacidad del suelo en cuestión y sus parámetros de funcionamiento revelados por estudios previos.

La cimentación es construida en hormigón, acero, madera y bambú o a su vez una combinación de estos; sin embargo, estos dos últimos materiales, no deben entrar en contacto directo con el suelo debido a su deterioro por humedad y solo serán utilizados como precursores de carga.



**Figura 96.** Sistemas de cimentaciones (a) zapata aislada, (b) zapata corrida, (c) losa de cimentación, (d) pilote pre-barrenado y hormigonado, (e) cimentación mediante pilotes y solera de montaje, y (f) zapata aislada con columna de bambú.

Adaptado de Cype (2013).

Los materiales que incurren en la cimentación de una estructura son diseñados y adecuados con características específicas que permitan dar cumplimiento a los siguientes parámetros (FEMA P-85, 2009):

- Soportar el peso de la casa, sus contenidos y sus ocupantes.
- Resistir las cargas de diseño del viento y las vibraciones ante eventos sísmicos.
- Elevar la casa lo suficiente para evitar las pérdidas por inundación.

En términos generales, todas las cimentaciones se dividen en dos categorías: fundaciones superficiales y fundaciones profundas. Las palabras "superficiales y profundas" se refieren a la profundidad del suelo en el que se construye el cimiento. Los cimientos poco profundos se los pueden hacer en profundidades de tan sólo 1 m, mientras que los cimientos profundos se pueden hacer a profundidades de 20 a 65 m. La primera categoría se utiliza para edificios pequeños y ligeros mientras que los otros se utilizan para edificaciones y estructuras con mayores dimensiones o cuando se presentan deficiencias fisiográficas en el terreno.

#### **6.2.1.2. Estructura de un cimiento**

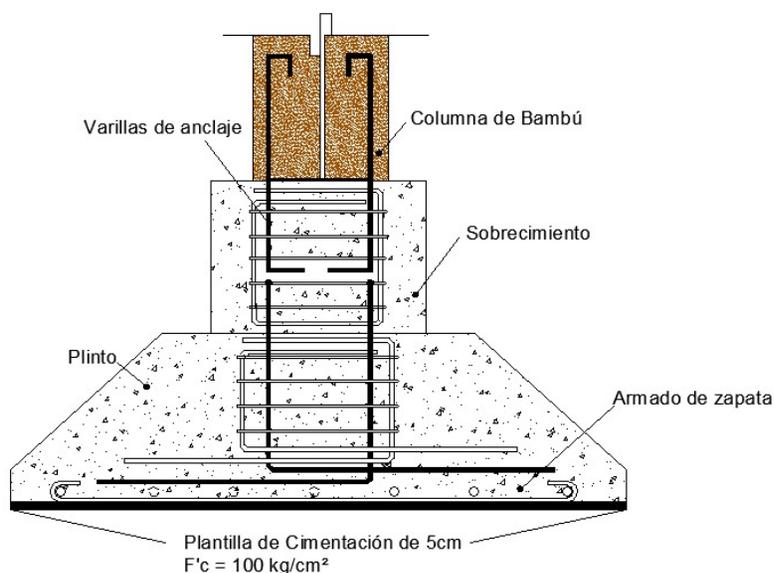
La normativa de INBAR (2015) estipula dimensiones de armados mínimos y la resistencia que deben tener los materiales que conforman una cimentación proyectada para viviendas de bambú de hasta dos pisos. Estos valores se presentan en la Tabla 47 y gráficamente se puede visualizar la configuración total en la Figura 97.

**Tabla 47**

*Valores mínimos para dimensiones, resistencia de materiales y refuerzo de cimentaciones.*

Dimensiones elementos del cimiento	Una planta	Dos plantas	Resistencia mínima MPa
Ancho	200 mm	250 mm	-
Alto	150 mm	200 mm	-
Refuerzo Longitudinal	4φ10mm	4 φ12mm	420
Refuerzo Transversal	1φ10mm @200mm	1φ10mm @200mm	240
Conectores de cortante	1 φ10mm @1m	1 φ12mm @1m	240
Anclaje antivuelco varilla embebida en bambú	1 φ12mm	1 φ12mm	420

Adaptado de INBAR (2015)



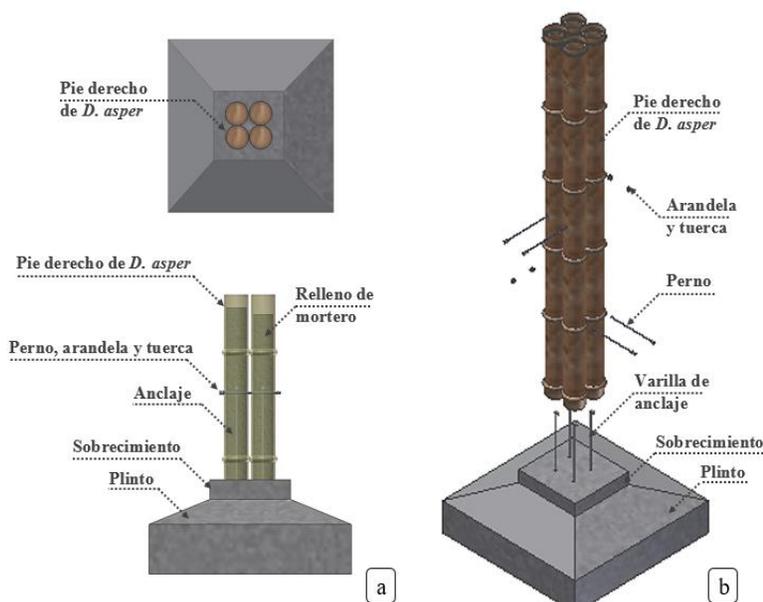
**Figura 97.** Configuración general de una cimentación para una estructura de bambú

### 6.2.1.3. Sobrecimiento

Este es un elemento que se coloca sobre la estructura del cimiento y se construye con hormigón reforzado; el cual debe sobresalir en al menos 400 mm desde el nivel del acabado y mínimo 30 mm por lado desde los bordes perimetrales de los culmos de bambú que conforman la columna. El sobrecimiento debe ser anclado a la

estructura de fundación mediante elementos de refuerzo (ver Figura 98), ya sea para la conformación de columnas o de muros (INBAR, 2015; NEC-SE-GUADÚA, 2016).

Por otra parte, la Normativa Colombiana (NSR, 2010) recomienda que, en caso de existir pendientes superiores al 5% el elemento debe construirse con un peralte constante en aquellos muros paralelos a las curvas de nivel; para el caso de los muros perpendiculares a las curvas de nivel, el peralte del sobrecimiento será variable y escalonado. Es importante recalcar que no deben construirse vigas de cimentación sin estabilizar la pendiente del terreno. Otro punto que destaca esta normativa es que la losa del piso acabada deberá cercar lateralmente al sobrecimiento, es decir, por ningún motivo este elemento participará como parte funcional integral de la fundación (NSR, 2010).

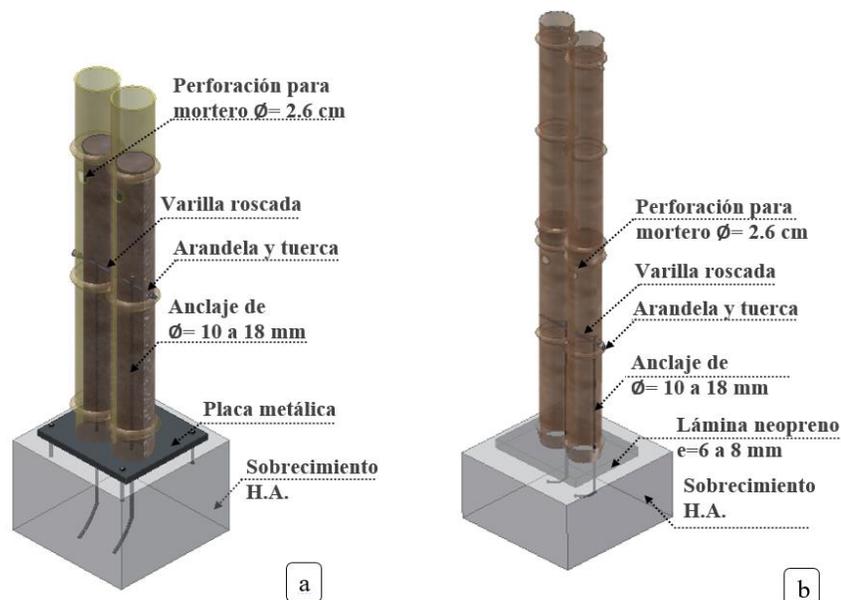


**Figura 98.** Conexión cimiento y sobrecimiento (a) corte general de la estructura con sobrecimiento, y (b) vista isométrica de la configuración del cimiento

#### **6.2.1.4. Anclajes para sobrecimiento y el bambú**

Existen varias maneras de realizar este tipo de conexiones cuya función es resistir la carga por gravedad y que a su vez son parte de los sistemas de soporte ante cargas laterales (Bonilla Jiménez et al., 2017). Es así que, estos anclajes pueden construirse mediante: pernos, barras corrugadas, placa base o elementos acoplados de acero de acuerdo a las solicitaciones requeridas en la etapa del diseño estructural (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

En el caso de que se utilicen barras de anclaje la NEC-SE-GUADÚA (2016) menciona que las barras que sobresalen del pedestal deben tener una longitud mínima de 30 cm con un diámetro mínimo de 10 mm y máximo de 18 mm; la selección correcta dentro de estos rangos dependerá de la altura de las columnas. Es necesario que las cañas se apoyen en el sobrecimiento a 4 o 5 cm por debajo del nudo final, sobre una placa de metal o una lámina de neopreno con espesores desde 0,6 a 1 cm (ver Figura 99). Previo al ingreso de las cañas dentro de los anclajes se deberá eliminar la estructura interna de los dos nudos inmediatos que se rellenarán con mortero; el cual, se contrae durante el curado, dejando un espacio entre el hormigón y la caña, por tanto, no es recomendable usar una mezcla de cemento y arena en proporción 1:2. La contracción puede reducirse con una mezcla de una parte de cemento para 3 o 4 partes de arena gruesa que puede tener hasta 4 mm de espesor (Minke, 2012), el orificio de ingreso de la mezcla se lo realizará con una sierra de copa de 2,5 cm de diámetro a una altura de 30 cm en la zona internodal.



**Figura 99.** Tipos de anclajes para el sobrecimiento (a) anclaje mediante varillas de acero (cabezal cubierto mediante placa metálica), y (b) anclaje mediante varillas de acero (cabezal cubierto mediante lámina de neopreno)

Si durante el análisis preliminar se determina la utilización de pletinas laterales de acero para el enlace entre el sobrecimiento y los culmos la NEC-SEGADÚA (2016) indica la utilización de dos platinas de acero de 4 cm de ancho y 0,5 cm de espesor cuya altura dependerá del peralte del sobrecimiento, sin embargo, la placa deberá sobresalir en al menos 25 cm después del pedestal (ver Figura 100) y la separación previa a la fundición estará en función del diámetro de los culmos. La normativa que establece estos lineamientos determina que las pletinas pueden o no estar previamente perforadas, alineadas y correctamente afianzadas con pernos, tuercas y arandelas; pero sí deja en constancia que los agujeros no deberán estar alineados en la misma cara y las placas deben ser tratadas anticipadamente con las capas protectoras mostradas en la Tabla 48, en especial en zonas costaneras.

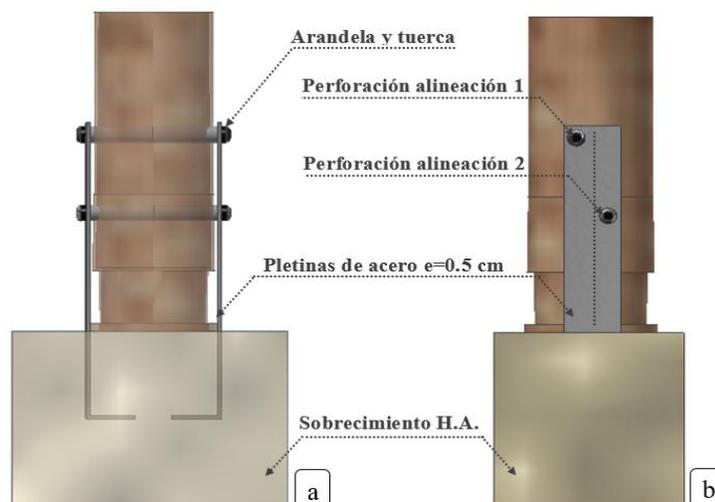
**Tabla 48***Capas de preservación para placas de anclaje.*

Número de capa	Imprimante	Observación
1ra.	Imprimante epóxico de dos componentes	Endurecedor tipo poliamida <sup>1</sup> de 100 micrones <sup>2</sup>
2da.	Pintura epóxica de dos componentes	Endurecedor poliamida <sup>1</sup> de 100 micrones <sup>2</sup>
3ra.	Pintura anticorrosiva	100 micrones <sup>2</sup>
4ta.	Pintura de acabado	100 micrones <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Compuesto químico orgánico formado mediante una reacción química que le confiere un elevado punto de fusión

<sup>2</sup>Las capas deben ser medidas en espesor de película seca (EPS)

Adaptado de NEC-SE-GUADÚA (2016).



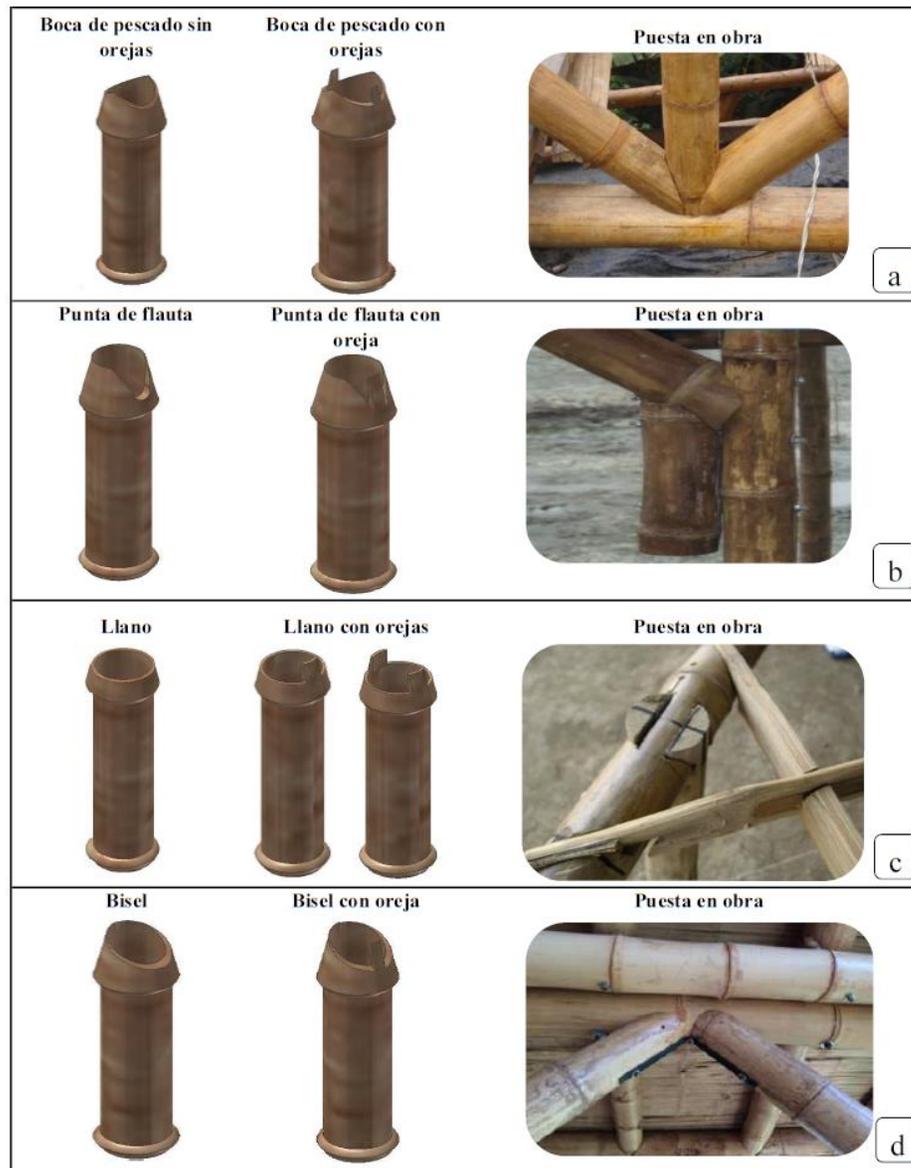
**Figura 100.** Conformación de platinas verticales de anclaje (a) vista superior del anclaje, y (b) corte longitudinal del anclaje.

## 6.2.2. Cortes y tipos de juntas entre culmos de bambú

### 6.2.2.1. Cortes

La NEC-SE-GUADÚA (2016) determina que los cortes en las piezas de bambú deben ser realizados con una predisposición cercana a un nudo y la distancia de éste al corte debe tener como mínimo 6 cm. Los cortes más especializados requieren de personal calificado para su elaboración, debido a la estricta configuración y grado de

alineación. En la Figura 101 se muestran los principales cortes que se emplean en los culmos de bambú, destacando a los dos primeros como los más utilizados para el montaje estructural de viviendas.



**Figura 101.** Tipologías de cortes en culmos de bambú y su forma de uso (a) cortes boca de pescado, (b) cortes punta de flauta, (c) cortes de boca recta, y (d) cortes en bisel

### **6.2.2.2. Juntas**

Uno de los aspectos más relevantes en la construcción con bambú es la formación de uniones que transfieren fuerzas desde un elemento a otro. Por ello, dado que las cañas tienen una sección tubular hueca y sus partes entre nudos sólo tienen fibras longitudinales, no pueden unirse de la misma manera que una construcción con madera. Por ejemplo, si se insertan clavos o tornillos en las piezas internodales sin haber taladrado previamente un agujero, se producen fisuras longitudinales, lo cual no sucede en la madera. Las perforaciones para el posicionamiento de un perno tendrán una excelente alineación con respecto a su eje y deben ser de 0,15 cm mayor que el perno. Los elementos metálicos utilizados en las juntas exteriores deben ser anticorrosivos, o en su defecto, tener un tratamiento anticorrosivo como se indicó en la Tabla 48 (Minke, 2012).

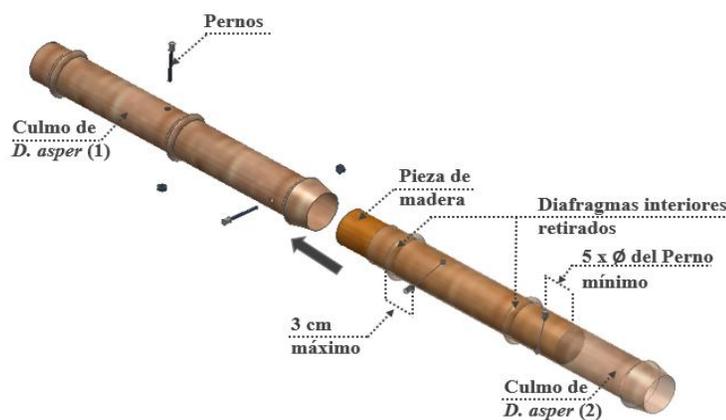
Si las cañas se someten a cargas que puedan provocar graves fisuras, es necesario rellenar con una mezcla de mortero de cemento los entrenudos adyacentes a la junta y también aquellos por donde pasan los pernos, preferiblemente con un aditivo plastificante que mejore la fluidez de la mezcla. En las juntas sometidas a tensión la distancia mínima será de 150 mm y máxima de 250 mm, pero si las juntas son sometidas a compresión su distancia requerida será de 100 mm (Minke, 2012).

#### **6.2.2.2.1. Conexiones longitudinales**

Este tipo de uniones se las aplica cuando es necesario incrementar la longitud de los tallos de acuerdo a la luz solicitada por la estructura en un eje común. Se

puede obtener la longitud requerida aplicando cualquiera de los siguientes casos (NEC-SE-GUADÚA, 2016):

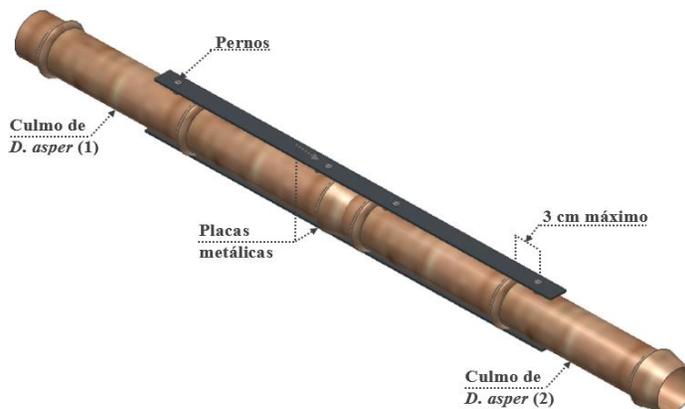
**i) Enlace con pieza de madera:** La Figura 102 muestra dos cañas con similares características físicas, mismas que se enlazarán mediante una pieza de madera insertada entre ambas, se sujeta a su vez por dos pernos de mínimo 0,9 cm cada uno, perpendiculares entre sí, cerca de los extremos de la pieza. Estos pernos estarán ubicados a una distancia máxima de 3 cm medida desde los nudos; el valor de la distancia interna existente entre el perno y el borde del trozo de madera será de mínimo cinco veces el diámetro del perno (NEC-SE-GUADÚA, 2016).



**Figura 102.** Junta longitudinal con madera

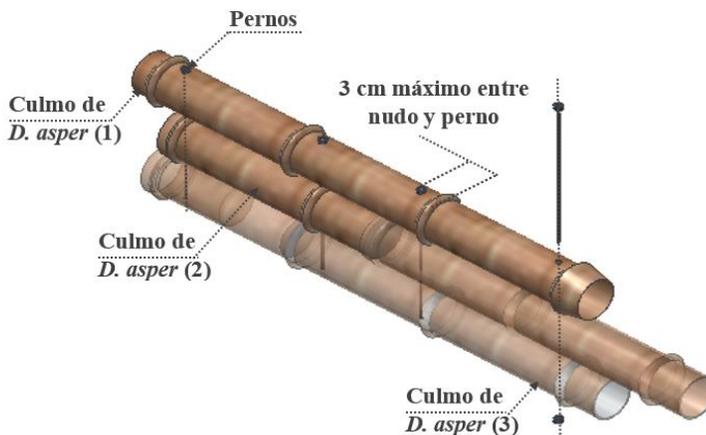
**ii) Enlace con dos pletinas metálicas:** Se realizará en cañas que presenten características físicas similares y se enlazarán mediante la utilización de dos placas de acero estructural con esfuerzo de fluencia mínimo de 240 MPa y un espesor de al menos 0,5 cm, el resto de dimensiones queda a discreción de los requerimientos de diseño (ver Figura 103). Al igual que en acotaciones anteriores los pernos se

ubicarán a una distancia máxima de 3 cm medidas desde los nudos para evitar la fractura nodal (NEC-SE-GUADÚA, 2016).



**Figura 103.** Junta longitudinal con placas metálicas

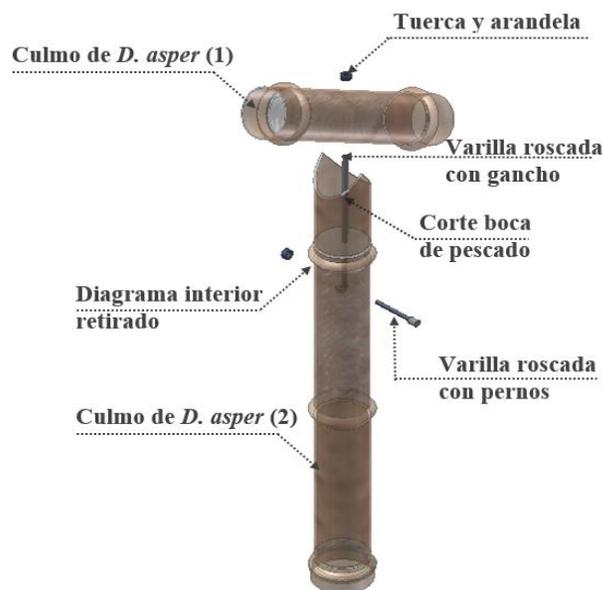
**iii) Enlace mediante dos culmos:** Este tipo de enlace no es frecuente, sin embargo, cuando se requiera utilizar esta conexión las cañas serán sujetas con pernos de mínimo 0,9 cm, los cuales atravesarán totalmente ambos diámetros (ver Figura 104). La norma no especifica el traslape mínimo al que se debe someter los culmos pero la alternancia internodal durante el emparejamiento de los mismos requiere máximo el 35% de la longitud total, adhiriéndose a los mismos principios que un empalme de varilla como lo menciona la NEC-SE-GUADÚA (2016).



**Figura 104.** Junta longitudinal entre culmos

#### 6.2.2.2.2. Conexiones perpendiculares

De manera general se usan estas sujeciones cuando se requiere alternar el sentido de una configuración unidireccional. Por lo cual, para emplear este sistema es necesario cortar una de las cañas con la configuración boca de pescado, despojándola de su membrana interior contigua debido a que se rellenará con mortero para evitar daños por las fuerzas cortantes generadas al colocar un perno de anclaje y someterlo a una fuerza de tensado, el mismo que es provocado por el acople de un nuevo tensor con gancho ubicado en la estructura del culmo ortogonal, cuyo diámetro previamente es seleccionado para encajar en el culmo con boca de pescado (ver Figura 105).



**Figura 105.** Junta transversal entre culmos

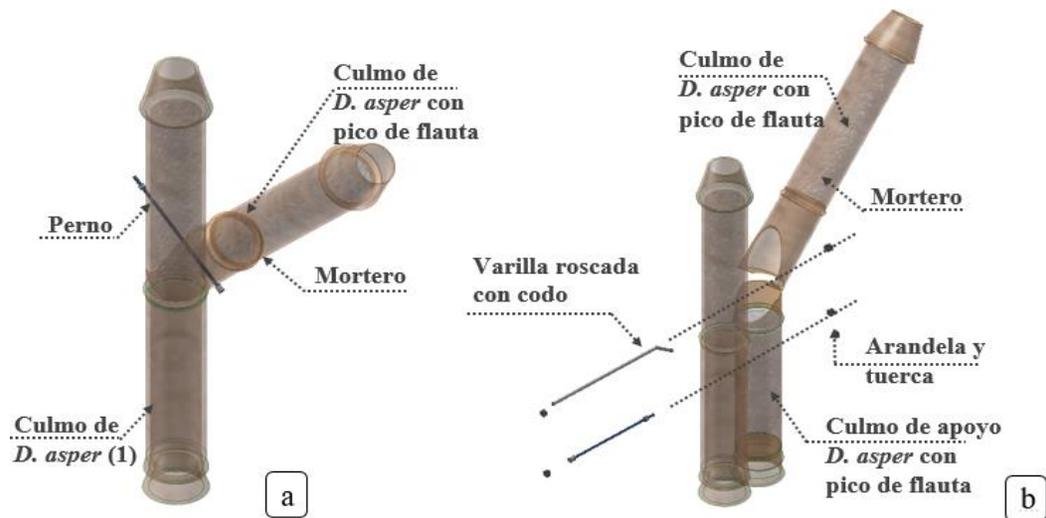
Existen consideraciones prioritarias establecidas por la NEC-SE-GUADÚA (2016) que se deben tomar en cuenta para la realización de este tipo de juntas; como por ejemplo, la sección interior del corte y el nudo más próximo deben tener una

distancia mínima de 6 cm mientras que los pernos de anclaje y tensión tendrán un diámetro mínimo de 0,95 cm con sus perforaciones respectivas, al igual que en otros casos, se las realizará con una separación máxima de 3 cm hacia el nudo.

#### **6.2.2.2.3. Conexiones diagonales**

La junta generada en este caso requiere minuciosidad en los detalles puesto que, los elementos deben alcanzar el mayor contacto posible. Será necesario establecer un corte punta de flauta cuyo ángulo permita lograr una configuración acertada ante la otra caña horizontal o vertical. La NEC-SE-GUADÚA (2016), establece que este tipo de conexión se afiance mediante (i) la utilización de dos pernos similares a los propuestos en la conexión longitudinal, anclando de esta manera el elemento en diagonal, o (ii) la utilización de una varilla roscada que atraviese los culmos en el ángulo formado por los mismos. La varilla deberá cruzar por detrás del nudo de la pieza con el corte flauta para evitar posibles fracturas [ver Figura 106 (a)].

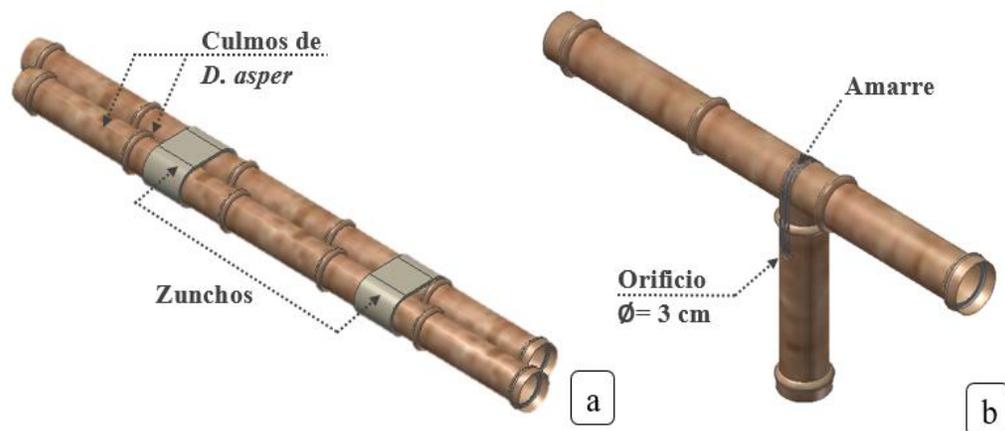
La diferencia entre utilizar pernos y varillas roscadas son las mismas que existen entre anclar o soldar una estructura metálica y el diseñador será quien decida la mejor opción por conveniencia del proyecto. Ambas conexiones pueden mejorarse con la integración de un culmo de soporte anclado como se muestra en la Figura 106 (b); por otro lado, las fisuras provocadas por la diagonal de esta conexión pueden corregirse mediante la utilización de piezas de madera dura (preservada) o neopreno que mejore este ensamblaje.



**Figura 106.** Conexiones diagonales (a) configuración tradicional, y (b) configuración con culmo de soporte

#### 6.2.2.2.4. Amarres, zunchos y otras uniones

Para este tipo de uniones se establece que serán permitidas únicamente cuando sea necesario conectar dos culmos [ver Figura 107 (a) y (b)], siempre que éstos no intervengan como transmisores de carga, los amarres o zunchos pueden ser elaborados con metal, caucho, cuero, nylon o plástico.



**Figura 107.** Otros tipos de uniones (a) unión tipo zunchos, y (b) unión con amarres

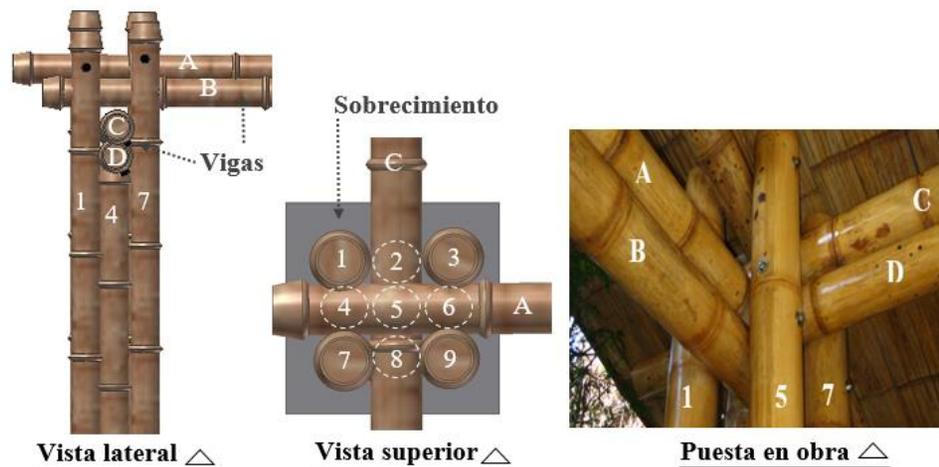
Los zunchos se los utilizan frecuentemente cuando se encuentran rajaduras en la caña de bambú que superen el 20% de la longitud total de la caña; también cuando existan grietas que hayan sobrepasado 2 nudos (INBAR et al., 2018).

**Nota:** La NEC-SE-GUADÚA (2016) establece que si se propone otro tipo de conexión ésta debe ser respaldada con una investigación de mínimo treinta ensayos que permitan exponer la capacidad mecánica de la unión.

### 6.2.3. Columnas

Este elemento de soporte vertical puede adquirir diversas adecuaciones y características de acuerdo a las exigencias dadas por el cálculo estructural, el distintivo esencial de esta estructura es que se le permite la configuración de una o más cañas orientadas en su forma natural de crecimiento y unidas mediante los métodos descritos anteriormente; generalmente las conexiones son apernadas y zunchadas. La distancia adecuada establecida por la normativa para ejecutar uniones en estos elementos no debe exceder en un tercio el peralte total de la columna (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

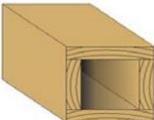
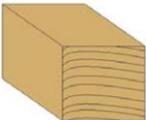
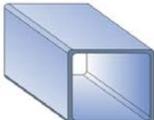
La carga axial en el análisis estructural determinará la configuración preliminar y la altura de las columnas; siempre existe el riesgo de adversidades en estos elementos como la presencia de pandeo por esbeltez, la cual puede solucionarse con la inclusión de más cañas a la estructura general a pesar del sobredimensionamiento generado (Minke, 2012). La Figura 108 muestra la configuración de columna más recurrente para viviendas de 2 pisos.



**Figura 108.** Estructura de una columna conformada por 9 culmos de bambú

Un estudio pormenorizado por Richard (2013) para su tesis doctoral en Pensilvania-Estados Unidos, comprobó el impacto constructivo que se presentaba al establecer una columna de bambú y la comparó con alternativas de madera y acero diseñadas bajo la misma capacidad de carga axial, determinando de esta manera las propiedades y comportamientos de los distintos materiales constructivos; haciendo mayor énfasis en la columna de bambú compuestas de cuatro tallos de la especie *Bambusa Stenostachya* con 2,60 m de altura unidas a través de varillas roscadas de acero, diseñada y probada de acuerdo con las directrices ISO 22156 e ISO 22157-1:2004. El estudio obtuvo los resultados mostrados en la Tabla 49 (la simbología utilizada se detalla en el capítulo 2 del presente estudio).

**Tabla 49***Comparación de columnas equivalentes de distinto material*

Configuración	Columna de bambú	Columna de madera reconstruida	Columna de madera	Acero	
Dimensiones	4 culmos	6x6	6x6	HSS3X3X1/8	HSS3X0,203
Fuente	Richard, (2013)	Harries et al. (2000)	NDS(2005)	AISC (2011)	
	Datos de ensayo	Datos de ensayo	Datos de diseño	Datos de diseño	
E(MPa)	13450	12400	12400	200000	
KL(mm)	2600	3050	2600	2600	2600
A(mm <sup>2</sup> )	12200	13070	17420	839	1077
I(mm <sup>4</sup> )	6700000	23700000	25300000	740000	690000
r(mm)	23.4	42.6	38.1	29.7	25.3
P(KN)	159	179	246	160	164
$\sigma_{cr}=P/A$ (M.Pa)	12.1	13,5-6,05	14.1	190	152
$\pi^2EI/(KL)^2$ (kN)	131	312	579	216	201
$\sigma_{comp}$ (M.Pa)	54,7	13,8	14,5	317	290
Peso de 2600 mm columna (Kg)	24.3	19.7	23.6	17.3	22.1
Gráficas					

Adaptado de Richard (2013).

Las secciones de las columnas de bambú compuestas son capaces de absorber grandes cargas axiales bajo amplios esfuerzos sin fragmentarse ni separarse, tal como se demuestra con el módulo de elasticidad 0,78 veces mayor que el de la madera, pero 14,8 veces menor que una columna equivalente de acero (teniendo en cuenta la especie particular de bambú analizada), por lo que puede ser una solución ideal de elementos con cualidades estructurales especiales en el marco sismorresistente dentro de un rango lineal y no lineal de deformación, destacando su conveniente capacidad de absorber energía en caso de daños causados por un terremoto.

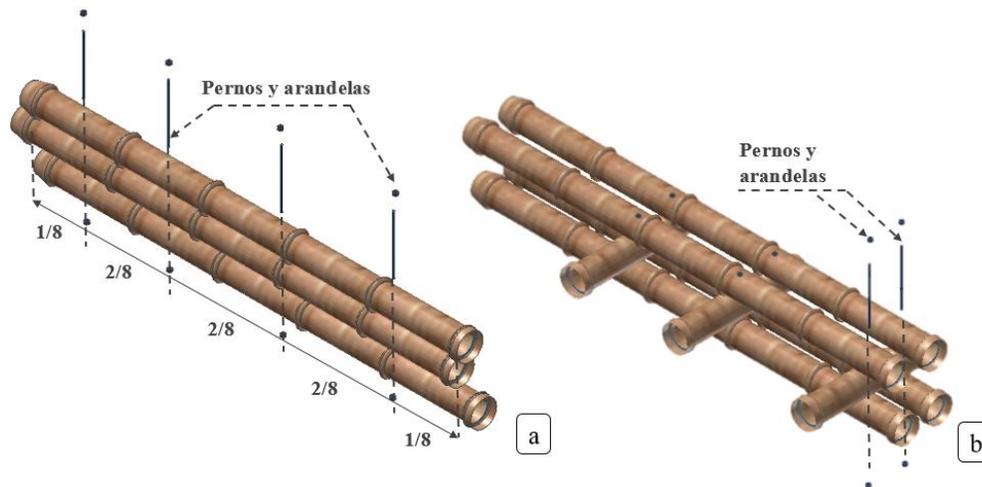
Los resultados experimentales para el comportamiento de pandeo de un solo cilindro en comparación con la adhesión de varios del mismo material son caracterizados mediante la

ecuación de Euler ( $\pi^2EI/KL^2$ ), que se utiliza típicamente en el diseño estructural constructivo, donde se demuestra, que la integración de varias cañas formando una estructura consolidada frente a sus equivalencias en madera y acero, reducen en gran porcentaje los fenómenos de curvatura en columnas (Richard, 2013).

#### **6.2.4. Vigas**

Otro de los elementos estructurales con importancia prioritaria son las vigas, las cuales funcionan a flexión y cuya resistencia provoca tensiones de tracción y compresión. Su configuración también es respaldada por el diseño estructural, donde las vigas compuestas deberán ser unidas mediante zunchos o tarugos de piezas de madera preservada tipo A o pernos roscados de mínimo 0,95 cm de diámetro, espaciados en al menos un cuarto de la longitud de este elemento como se muestra en la Figura 109 (a). De ser necesario aumentar la longitud de la viga se realizarán las uniones descritas en el numeral 6.1.2.2.1 (conexiones longitudinales), destacando nuevamente la alternabilidad internodal entre las cañas y si el cálculo estructural lo requiere se efectuará una configuración longitudinal ortogonal [ver Figura 109 (b)] (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

Se deben tomar en consideración las mismas recomendaciones de relleno con mortero que se han evaluado a lo largo del capítulo para evitar fisuras por corte y tracción; los extremos de las vigas expuestas también deben ser rellenadas o en su defecto usar yeso, poliuretano o masilla de madera para precautelar la integridad del elemento frente a agentes externos.



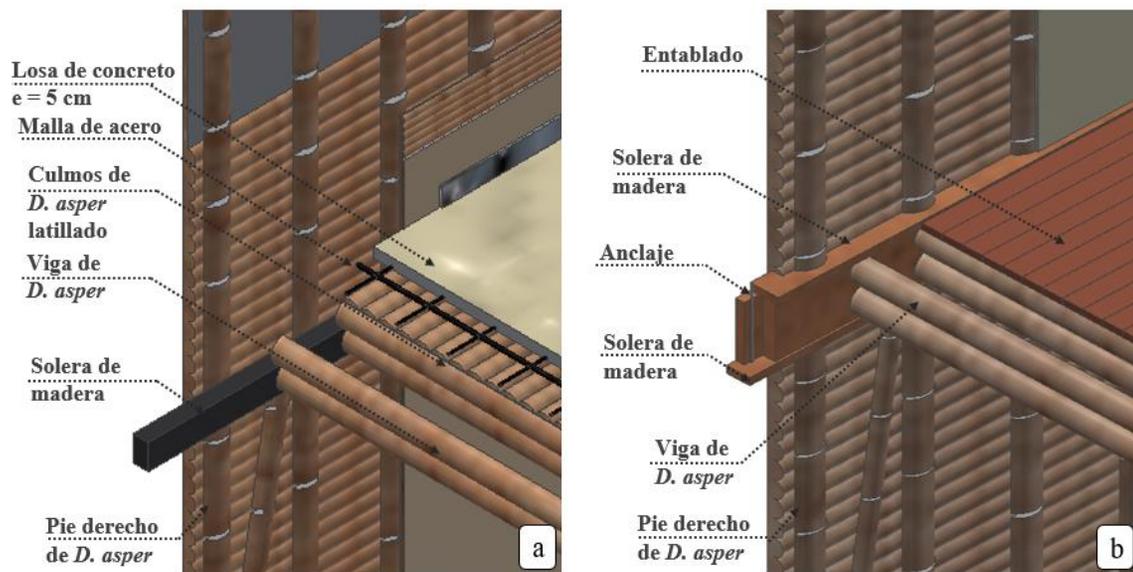
**Figura 109.** Configuración de vigas con culmos de bambú  
(a) viga compuesta longitudinal, y (b) viga compuesta ortogonal

### 6.2.5. Entrepisos

Los entrepisos son elementos que debido a su ubicación se encargan de resistir cargas verticales, por lo que la rigidez que presenta debe garantizar su trabajo como diafragma (Minke, 2012), sin embargo, éste debe ser liviano para evitar sobrecarga en la estructura. La NEC-SE-GUADÚA (2016) establece un peso máximo para el recubrimiento sobre esta estructura de  $120 \text{ kg/cm}^2$ , a menos que el análisis estructural respectivo determine lo contrario. Las configuraciones más comunes para la construcción de esta estructura utilizan combinaciones de (i) bambú, hierro y hormigón [ver Figura 110 (a)], o (ii) bambú y madera [ver Figura 110 (b)].

La normativa propone también que para evitar los problemas de aplastamiento entre las vigas y los entrepisos existen dos alternativas (i) utilizar cuñas de madera con una altura igual a la de la viga o (ii) rellenar las secciones internodales de apoyo con mortero.

Las soleras y todos los elementos que configuran el entrepiso deben estar vinculados correctamente para asegurar el trabajo global con toda la estructura; de ser necesario, la construcción de cielo raso por debajo de este elemento se ubicará el espaciamiento interior adecuado.



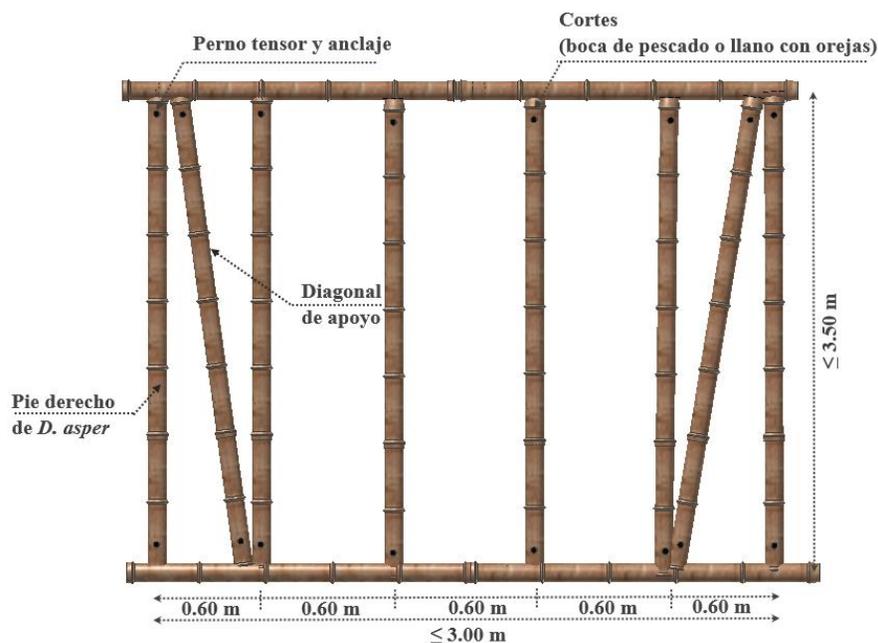
**Figura 110.** Tipos de entrepisos (a) configuración con entrepiso concreto y bambú, y (b) configuración con entrepiso entablado con bambú

#### 6.2.6. Tableros y muros estructurales

En esta sección se efectuarán varias consideraciones y tipologías estructurales que se utilizan para la fabricación de tableros con culmos de bambú, sabiendo que el entramado puede variar entre bambú y madera o únicamente bambú dependiendo las solicitaciones en el análisis estructural. Esta configuración está compuesta por piezas verticales u horizontales llamadas soleras y pie-derechos respectivamente, así como de elementos diagonales rigidizadores.

La normativa NSR (2010) establece que los diámetros mínimos de los culmos en estas estructuras no deben ser inferiores a 8 cm, mientras que las soleras de madera deben tener

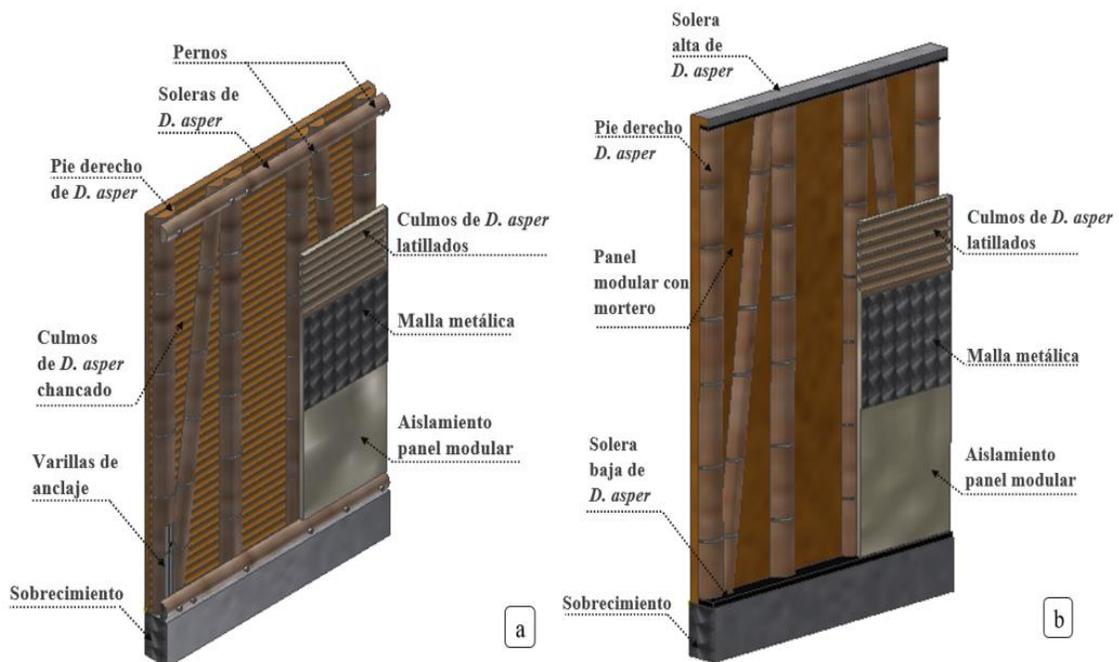
como espesor mínimo 3,5 cm para la superior y 2,5 cm para la inferior, valores con los que la NEC-SE-GUADÚA (2016) concuerda; sin embargo, la normativa ecuatoriana actual plantea varias consideraciones adicionales a tomar en cuenta, como por ejemplo, menciona que el tamaño máximo de los paneles deben ser de 3,0 x 3,5 m en base y en altura respectivamente, si se requiere mayores longitudes o alturas se debe partir con esta base. La configuración y aseguramiento de los culmos se harán mediante las uniones antes especificadas y se recomienda también que las cañas internas sean colocadas con una separación máxima de 60 cm entre ejes como se muestra en la Figura 111.



**Figura 111.** Configuración de un entramado de bambú

La vinculación de varios entramados crea muros estructurales, que pueden conformarse de bambú, madera o una combinación entre ellos [ver Figura 112 (a) y (b)]. Por su funcionalidad los muros estructurales atienden a una clasificación de (i) carga, utilizados para transmitir fuerzas horizontales y sustentar cargas verticales, (ii) rigidez, cuya función principal

es complementar la acción de soporte ante fuerzas horizontales en las dos direcciones ortogonales en planta de una estructura, y (iii) división, los cuales simplemente separan ambientes. Las uniones entre muros se deben hacer mediante pernos de mínimo 0,9 cm y tener como mínimo tres vínculos por cada estructura anexa que serán colocadas en cada tercio de la altura total (Bonilla Jiménez et al., 2017; Minke, 2012).

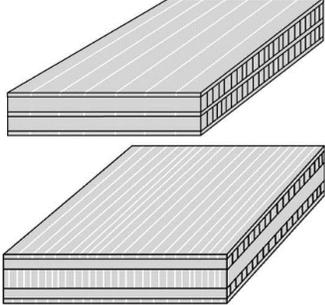


**Figura 112.** Tipos de muros estructurales (a) muro con soleras de bambú y (b) muro con soleras de madera

### 6.2.7. Recubrimientos

Tal como se pudo apreciar en la Figura 112, para conformar completamente un muro estructural se plantea la utilización de diversas maneras de revestimiento que darán soporte y seguridad en el inmobiliario, estas diferentes técnicas son detalladas en la Tabla 50.

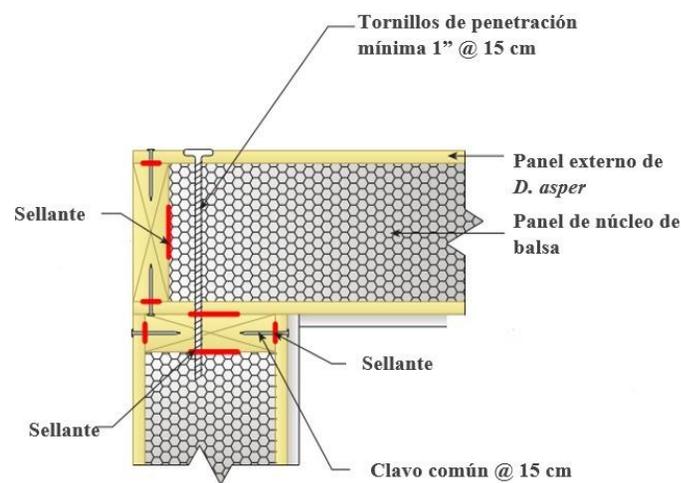
**Tabla 50***Tipos de revestimiento para estructuras modulares de bambú y madera*

Tipos de revestimiento Recubrimiento con latillas de bambú	Recubrimiento con mortero de arena y cemento	Recubrimiento con tableros prensados de bambú
		
<p><b>Observaciones:</b></p> <p>Los paneles pueden ser recubiertos con una o varias capas de latillas colocadas con la piel exterior hacia afuera.</p> <p>Estas latillas deben estar previamente secas y preservadas con anchos y espesores uniformes</p> <p>Para el aseguramiento de las latillas a la estructura se utilizarán clavos de 1 1/2" enlazados por alambre galvanizado No18</p> <p>Para evitar fisuramiento antes del clavado se recomienda realizar una incisión en forma de cruz</p> <p>Antes del recubrimiento se deben realizar todas las instalaciones eléctricas y sanitarias correspondientes</p>	<p><b>Observaciones:</b></p> <p>Los paneles son recubiertos nuevamente con caña picada de forma ortogonal; la latillas han sido previamente desprovistas de la dermis</p> <p>Las latillas serán aseguradas de tal manera que no quede completamente cerrada hendiduras en las que ingresará el mortero</p> <p>Se realizara el mismo aseguramiento como en el recubrimiento con latillas y se incluirán previamente las instalaciones necesarias</p> <p><b>Primera capa:</b> Se debe humedecer el recubrimiento de la caña para posteriormente colocar la capa de mortero cemento-arena en proporción 1:3 finalmente hidratar esta superficie por 8 días</p> <p><b>Segunda capa:</b> Hidratar la superficie para luego colocar una segunda capa de mortero (Cemento-cal-arena) en proporción 1:1:3 y volver a hidratar</p>	<p><b>Observaciones:</b></p> <p>Estos tableros serán colocados y dimensionados de acuerdo a los requerimientos del constructor</p> <p>Estarán anclados a la estructura mediante tornillos avellanados para madera o autoperforantes para anclarse a estructuras metálicas</p> <p>La separación para cada tornillo de anclaje será 2,5 cm para madera y 3 cm para estructura metálicas</p> <p>Los tableros deben tener un espesor mínimo de 10 cm para paneles cuya cara se oriente hacia el exterior; para caras hacia el interior, el panel puede ser de has 8 cm de espesor hasta generar el panel tipo sándwich de ancho requerido.</p> <p>Si la estructura de soporte es de bambú, se recomienda colocar tiras de madera que generen una guía de niveladora para los paneles</p>

Resumido de NEC-SE-GUADÚA (2016)

### 6.2.7.1. Uniones entre paneles

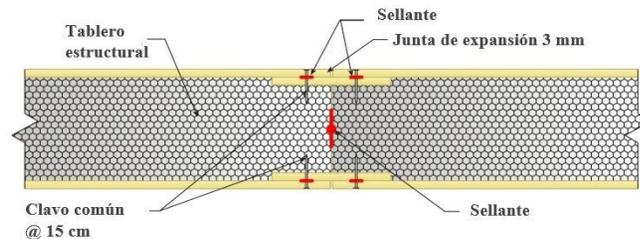
Para generar una conexión adecuada entre los tableros estructurales tipo sándwich compuestos de bambú y balsa expuestas en el manual de construcción de paneles estructurales aislados; Rungthonkit (2012) propone la utilización de tornillos con un mínimo de 1 pulgada de penetración, con un espaciamiento máximo de 60 cm a lo largo del tablero en conexiones esquineras, además para proteger el núcleo de balsa se debe colocar un tablero de fondo con el mismo material de los paneles externos, asegurándolo con clavos comunes cada 15 cm en ambas caras, adicionalmente se utilizará un sellante adecuado en lugares donde se haya insertado tornillos o clavos para prevenir la entrada de agua u otra sustancia que pueda afectar la integridad del elemento, tal como se puede observar en la Figura 113.



**Figura 113.** Detalle de unión transversal entre tableros estructurales  
Adaptado de Rungthonkit (2012)

Para unir dos tableros longitudinalmente se utilizará una porción del panel externo de mínimo 10 cm de ancho por la altura del tablero, unido con clavos comunes

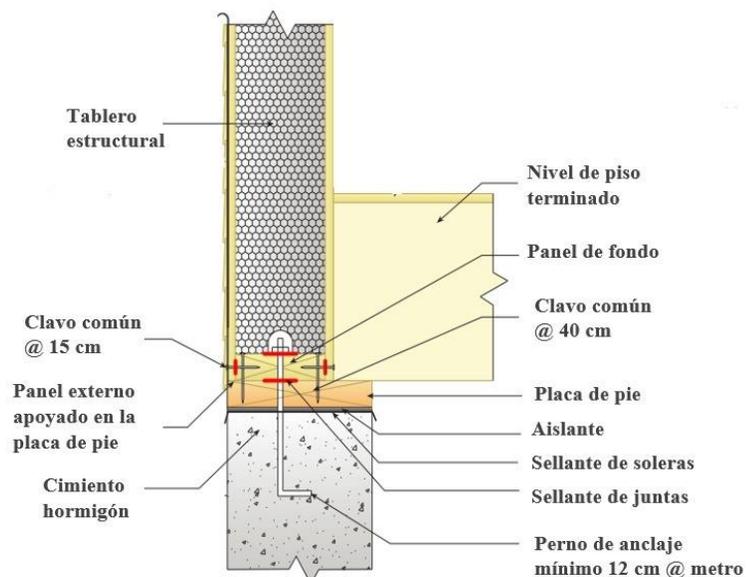
cada 15 cm, dejando una junta de expansión entre tableros de 3 mm; se utilizará también un sellante adecuado en los lugares de inserción de clavos (ver Figura 114)



**Figura 114.** Detalle de unión longitudinal entre tableros estructurales  
Adaptado de Rungthonkit (2012)

### 6.2.7.2. Unión cemento-tableros estructurales

En la unión entre la cimentación y los tableros estructurales se utilizarán pernos de anclaje con un diámetro mínimo de 12 mm @ metro, además se deberá colocar una placa de pie o solera entre el cemento y el tablero unidos con clavos cada 40 cm a cada lado. Al igual que en otras uniones se deberá sellar los agujeros de los pernos, tornillos y clavos, como se puede observar en la Figura 115.

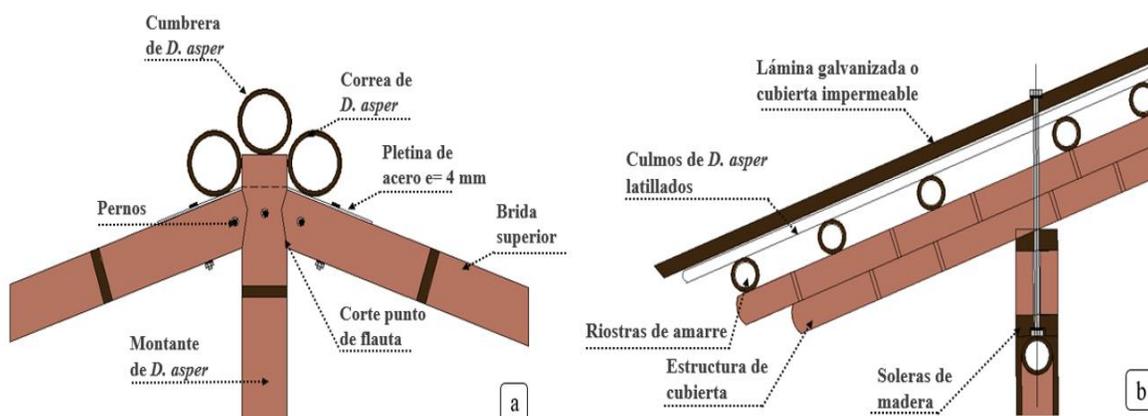


**Figura 115.** Detalle de unión cemento- tablero estructural  
Adaptado de Rungthonkit (2012)

### 6.2.8. Cubiertas

La cubierta o comúnmente llamado techo en la construcción residencial se presenta como un sistema estructural inclinado que soporta cargas verticales gravitatorias y cargas laterales de viento las cuales son transferidas a las paredes del nivel inferior inmediato, la normativa NEC-SE-GUADÚA (2016) establece que este elemento debe poseer salientes que cubran el contorno de la vivienda con un ángulo respecto a la radiación UV de 20° a 30°, lo cual permite proteger los culmos de la radiación y cualquier precipitación, así como también, para contrarrestar las fuerzas del viento. Por lo general los techos se construyen mediante vigas, travesaños y vigas de cumbrera con anclajes y arriostramientos para vigas, columnas y muros. Las viguetas o alfardas son miembros repetitivos de la estructura que soportan el revestimiento del techo y que típicamente se extienden por toda la superficie del mismo. Estos elementos también se unen a la cresta con un tablero principal o una viga de cumbrera [ver Figura 116 (a)]. A su vez las viguetas también pueden ser reforzadas con celosías desde la mitad de la envergadura utilizando intercaladamente 2 riostras verticales y 2 correderas. La distancia entre viguetas no será superior a 120 cm en el caso de vigas de techo. La Figura 116 (b) muestra que para aleros mayores de 150 cm se deberá colocar un apoyo adicional (Minke, 2012).

Para el recubrimiento de cubiertas se deben usar elementos impermeables; en el caso del terminado con teja se procura aislar la cubierta y toda la estructura para evitar humedad por capilaridad mientras que cuando se utiliza cielo raso se tendrá que mantener un espacio libre entre éste y la cubierta de al menos 2 cm utilizando materiales livianos (NEC-SE-GUADÚA, 2016).



**Figura 116.** Configuración de una cubierta de bambú (a) vista frontal de estructura de cubierta con viga de cumbrera, y (b) vista frontal de un alero

### 6.3. Mantenimiento de las estructuras

Cualquier estructura proveniente de un material biológico requiere de una buena preservación y acabado para optimizar su vida útil y su valor estético, en el caso de esta investigación los métodos más efectivos de preservación son los mencionados en la sección 3.4 del presente documento, mientras que el acabado queda a criterio del constructor, mismo que puede implementarlo con: ceras, lacas, pinturas plásticas o barnices. La NEC-SE-GUADÚA (2016), establece en la Tabla 51 los lineamientos que garantizarán la durabilidad de las estructuras de bambú.

#### **Tabla 51**

##### *Optimización de la vida útil en elementos constituidos por bambú*

1. Cubrir los extremos vacíos de los culmos
2. Los extremos sobrantes de pernos y varillas de anclaje deben ser cortados, lijados y protegidos con productos anticorrosivos.
3. Inspeccionar las juntas de la estructura cada 6 meses después de la construcción
4. Controlar el estado físico de los elementos estructurales, si estos son afectados por agentes patógenos (hongos, insectos), reemplazarlos inmediatamente.
5. Realizar una revisión mínima anual de las consideraciones antes citadas.

Resumido de NEC-SE-GUADÚA (2016).

## 6.4. Método de diseño estructural

### 6.4.1. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad compensados

Inicialmente se partió de las Tablas 38 y 39, tomadas del capítulo IV de la presente investigación, en las cuales se muestran los esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad de diseño [calculados a través de la normativa NSR (2010)] para los diferentes modos mecánicos analizados en el *D. asper*. Consecuentemente como se detalló en el capítulo V, se procedió a compensar los esfuerzos de compresión y flexión (modos mecánicos gobernantes del espécimen) a través del modelamiento computacional con elementos finitos en el software LsDyna (ver Tabla 43). Bajo esta premisa, se muestra a continuación en la Tabla 52 las propiedades físicas y mecánicas finales del *D. asper* que se utilizarán durante el diseño estructural de las viviendas propuestas.

**Tabla 52**

*Propiedades físico-mecánicas de diseño del D. asper*

MODO MECÁNICO/PROPIEDAD	Unidad	Compresión	Flexión	Tracción	Corte	
Densidad básica ( $\delta_b$ )	(kg/m <sup>3</sup> )		686,04			
Contenido de humedad (CH)	(%)	12%	17%	10%	12%	
Esfuerzo admisible ( $\sigma_{adm}$ )	(MPa)	31,63	34,58	18,91	2,38	
Módulo de elasticidad/rigidez	Módulo promedio (MOE <sub>0.5</sub> – G <sub>0.5</sub> )	(MPa)	36686,21	20175,76	21944,90	4051,98
	Módulo percentil 5 (MOE <sub>0.05</sub> – G <sub>0.05</sub> )	(MPa)	23453,63	18812,31	20668,70	3422,34
	Módulo mínimo (MOE <sub>mín</sub> – G <sub>mín</sub> )	(MPa)	21095,50	18609,38	20567,00	3405,35

\* Valores calculados a través de la normativa NSR-10 (AIS, 2010).

\* Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad tomados de la sección media nodal del culmo para todos los modos mecánicos.

\* Densidad básica promedio unificada tomada de los modos mecánicos gobernantes (compresión-flexión)

### 6.4.2. Coeficientes de modificación

En base a los valores obtenidos en la Tabla 52 se realizarán los cálculos para diseñar los diferentes elementos estructurales (principales y secundarios) de los prototipos de vivienda;

es importante mencionar que para cada diseño estructural se debe analizar los esfuerzos admisibles a través de los coeficientes de modificación que propone la normativa NSR (2010), según el comportamiento físico y mecánico al que estará sometido el elemento. Los esfuerzos admisibles modificados se calculan a través de la Ecuación (19),

$$\sigma'_{adm-i} = \sigma_{adm-i} * C_D * C_m * C_t * C_L * C_F * C_r * C_p * C_c \quad (19)$$

donde  $\sigma'_{adm-i}$  es el esfuerzo admisible modificado en el modo mecánico  $i$  en (MPa),  $\sigma_{adm-i}$  es el esfuerzo admisible en el modo mecánico  $i$  en (MPa),  $C_D$  es el coeficiente de modificación por duración de carga,  $C_m$  es el coeficiente de modificación por contenido de humedad,  $C_t$  es el coeficiente de modificación por temperatura,  $C_L$  es el coeficiente de modificación por estabilidad lateral de vigas,  $C_F$  es el coeficiente de modificación por forma,  $C_r$  es el coeficiente de modificación por restitución de cargas, acción conjunta,  $C_p$  es el coeficiente de modificación por estabilidad de columnas,  $C_c$  es el coeficiente de modificación por cortante,  $i$  es el modo mecánico de compresión, flexión, tracción o corte.

A continuación se presenta un desglose de tablas, fórmulas y consideraciones que implican la correcta utilización de los coeficientes de modificación.

**Coefficiente de modificación por duración de carga (C<sub>D</sub>):** Se considera que la duración normal de una carga bordea los 10 años, es decir permanentemente, pero en el caso que un elemento estructural presente duraciones de carga distintas, es necesario aplicar los coeficientes mostrados en la Tabla 53. Es importante acotar que los valores presentados no son acumulables, por lo tanto si existiera combinación de cargas, el dimensionamiento de los elementos debe realizarse para la condición más desfavorable.

**Tabla 53***Coefficiente de modificación por duración de carga*

Duración de carga	Flexión perpendicular	Tracción	Compresión paralela	Compresión perpendicular	Corte	Carga de diseño
Permanente	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	Muerta
10 años	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	Viva
2 meses	1,15	1,15	1,15	0,90	1,15	Construcción
7 días	1,25	1,25	1,25	0,90	1,25	
10 minutos	1,60	1,60	1,60	0,90	1,60	Viento y sismo
Impacto	2,00	2,00	2,00	0,90	2,00	Impacto

Tomado de NSR (2010) Tabla G.12.7-4

**Coefficiente de modificación por contenido de humedad ( $C_m$ ):** Según la normativa NSR (2010) sección G-12.7.7 argumenta que si las condiciones medioambientales generan una variación ascendente desde el 12% en el contenido de humedad, se procederá a un reajuste de los módulos de elasticidad y esfuerzos admisibles en base a los coeficientes mostrados en la presente Tabla 54; por el contrario, si el secado artificial provoca una disminución por debajo del 12% se asume que el biomaterial compensará este déficit a través de la estabilidad ambiental del lugar de implantación o acopio. Esta corrección se la realiza a razón de que las propiedades físicas tienen una marcada incidencia en el comportamiento mecánico del biomaterial.

**Tabla 54***Coefficiente de modificación por contenido de humedad*

Esfuerzos admisibles / CH		≤ 12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	19%
<b>Flexión</b>	$\sigma_{adm-flex}$	1,00	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,70
<b>Tracción</b>	$\sigma_{adm-trac}$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
<b>Compresión paralela</b>	$\sigma_{adm-com-ll}$	1,00	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,70
<b>Compresión perpendicular</b>	$\sigma_{adm-com-L}$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
<b>Corte</b>	$\sigma_{adm-corte}$	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,80
<b>Módulo de Elasticidad</b>	$MOE_{0,5}$	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90
	$MOE_{0,05}$								
	$MOE_{min}$								

Tomado de NSR (2010) Tabla G.12.7-5

**Coefficiente de modificación por temperatura ( $C_t$ ):** En el caso que los elementos estructurales de bambú sean sometidos a altas temperaturas, se procederá a modificar sus esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad según la condición de temperatura mostrada en la Tabla 55.

**Tabla 55**  
*Coefficiente de modificación por temperatura*

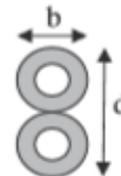
Esfuerzos	Condiciones de servicio	$(C_t)$		
		$T \leq 37^\circ C$	$37^\circ C \leq T \leq 52^\circ C$	$52^\circ C \leq T \leq 65^\circ C$
<b>Flexión</b>	$\sigma_{adm-flex}$	Húmedo	0,60	0,40
		Seco	0,85	0,60
<b>Tracción</b>	$\sigma_{adm-trac}$	Húmedo	0,85	0,80
		Seco	0,90	
<b>Compresión paralela</b>	$\sigma_{adm-com-  }$	Húmedo	0,65	0,40
		Seco	0,80	0,60
<b>Compresión perpendicular</b>	$\sigma_{adm-com-\perp}$	Húmedo	0,80	0,50
		Seco	0,90	0,70
<b>Corte</b>	$\sigma_{adm-corte}$	Húmedo	0,65	0,40
		Seco	0,80	0,60
<b>Módulo de Elasticidad</b>	MOE	Húmedo	0,80	0,80
		Seco	0,90	

Tomado de NSR (2010) Tabla G.12.7-6

**Coefficiente de modificación por estabilidad lateral de vigas ( $C_L$ ):** En la Tabla 56 se presenta los coeficientes de modificación para vigas o viguetas conformadas por uno, dos o más culmos de bambú, comúnmente se denomina a esto sección compuesta y se necesita verificación de su soporte lateral en la zona comprimida. El coeficiente de modificación por estabilidad lateral, tiene en cuenta la reducción de la capacidad de carga de un elemento sometido a flexión por causa de la inestabilidad lateral o pandeo, que sucede cuando la zona a compresión de una viga se comporta como una columna.

**Tabla 56***Coefficiente de modificación por estabilidad de vigas*

d/b	C <sub>i</sub>	Observaciones (Si d/b = i)
1	1	No necesita apoyo lateral
2	0,98	No necesita apoyo lateral
3	0,95	Limitar el desplazamiento lateral de los apoyos
4	0,91	Limitar el desplazamiento lateral de los apoyos y del borde en compresión con correas o viguetas
5	0,87	Limitar el desplazamiento lateral con un apoyo continuo de borde (entablado)



Adaptado de NSR (2010) Tabla G.12.8-5

**Coefficiente de modificación por forma (C<sub>F</sub>):** Cuando el elemento estructural excede en diámetro  $D_e > 340$  mm, el valor  $\sigma_{adm-flex}$  (esfuerzo admisible a flexión) será multiplicado por el factor de altura C<sub>F</sub> establecido según la Ecuación (20) que propone la normativa NSR (2010),

$$C_F = \left( \frac{340}{D_e} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (20)$$

donde  $D_e$  es diámetro externo de la sección transversal.

**Coefficiente de modificación por restitución de cargas, acción conjunta (C<sub>r</sub>):** Los esfuerzos admisibles podrán incrementarse en un 10% ( $C_L=1,10$ ) cuando exista una acción en conjunto de cuatro o más elementos de igual rigidez como en el caso de viguetas y pies derechos en entramados, siempre y cuando a separación no sea superior a 0,6 metros.

**Coefficiente de modificación por estabilidad de columnas (C<sub>p</sub>):** Este coeficiente debe ser calculado a través de la Ecuación (21),

$$C_p = \frac{1 + \left( \frac{\sigma_{ce}}{\sigma_{adm-comp}^*} \right)}{2C} - \sqrt{\left( \left( \frac{1 + \left( \frac{\sigma_{ce}}{\sigma_{adm-comp}^*} \right)}{2C} \right)^2 - \frac{\left( \frac{\sigma_{ce}}{\sigma_{adm-comp}^*} \right)}{C} \right)} \quad (21)$$

donde es  $\sigma_{adm-comp}^*$  el esfuerzo admisible de compresión paralelo a la fibra multiplicado por los factores de modificación, excepto  $C_p$  en (MPa),  $C$  es el coeficiente valorizado (se toma 0.8 para cualquier sección transversal),  $\sigma_{ce}$  es el esfuerzo crítico en (MPa). Para calcular este último factor se lo realiza mediante la Ecuación (22) que propone la normativa NSR (2010),

$$\sigma_{ce} = \frac{\pi^2 * MOE_{min}}{\lambda = \left(\frac{L_e}{r}\right)^2} \quad (22)$$

donde  $L_e$  la longitud efectiva en (mm),  $r$  el radio de giro de la sección en (mm),  $\lambda$  es la medida de esbeltez, la cual debe ser menor o igual a 50, excepto durante la construcción donde podrá ser menor o igual a 75,  $MOE_{min}$  es el módulo de elasticidad mínimo modificado en (MPa)

**Coefficiente de modificación por cortante ( $C_c$ ):** En lo que refiere al efecto del cortante, para los elementos con relación de  $\frac{l}{D_e} \leq 15$ , se debe realizar una corrección por cortante, estipulado en la siguiente Tabla 57, la misma que relaciona los valores de  $C_c$  para el módulo de elasticidad promedio  $MOE_{0.5}$ . Siendo  $l$  la longitud del culmo de bambú, en (mm) y  $D_e$  es el diámetro externo del bambú, en (mm).

**Tabla 57**  
*Coefficiente de modificación por cortante*

<b>L/De</b>	<b>C<sub>c</sub></b>
1	0,7
5	0,7
7	0,75
9	0,81
11	0,86
13	0,91
15	0,93
>15	1

Fuente: NSR (2010) Tabla G.12.8-3

## **6.5. Cálculo estructural de la Vivienda N°1 – Prototipo social**

### **6.5.1. Detalles arquitectónicos**

El detalle arquitectónico es la manera más directa y precisa de concretar una idea sobre la transformación del entorno como realización material de las necesidades humanas. A su vez funciona como puente entre la formulación abstracta y los espacios construidos que generalmente son vistos como la última fase de la formulación del proyecto (Pevsner y Bohigas, 1979). El diseño arquitectónico se presenta como una vivienda unifamiliar en una sola planta enfocado con carácter social, éste posee 102 m<sup>2</sup> de construcción distribuidos en sala, comedor, cocina tipo americana, baño social, 1 dormitorio master con baño completo propio, 2 dormitorios secundarios con baño completo compartido y cuarto de lavado. Para el dimensionamiento en elevación del espacio fijado por el proyecto, se aplicaron guías obtenidas de Neufert et al. (1995), con el propósito de aplicar técnicas de aprovechamiento para la optimización de luz, calor y ventilación en espacios interiores. En el Anexo 11 se presentan los planos en planta y fachadas (considerando vistas frontales, posteriores y laterales respectivamente).

El material estructural principal será el *D. asper* de la presente investigación. La cubierta se conformará por celosías de bambú encerrando a la vivienda con una membrana asfáltica de gravilla como acabado final (ver Figura 117). Sus fachadas y mampostería constarán de entramados con culmos y esterillas de bambú, revestidos con mortero de hormigón, enlucidos y pintados de color blanco, además se contará con 2 paredes ajardinadas que en su conjunto dejarán notar una construcción mixta estéticamente agradable, ecológica, sostenible, con grandes potenciales estructurales.

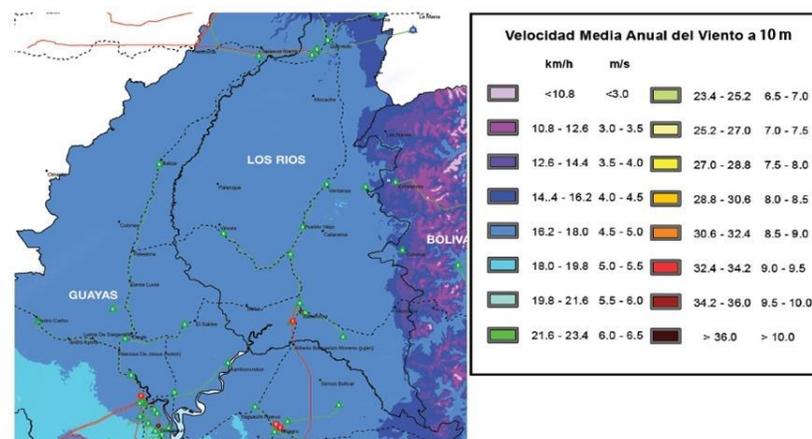


**Figura 117.** Propuesta de cubierta de la vivienda N° 1

## 6.5.2. Carga de viento

### 6.5.2.1. Velocidad instantánea máxima del viento

La velocidad de diseño para viento que alcance los 10 m de altura será la que se disponga como velocidad máxima para la zona de ubicación de la edificación. La ciudad tentativa donde se construirá la vivienda es Quevedo-Los Ríos y en esta zona la velocidad del viento alcanza los 18 km/h (ver Figura 118), sin embargo, la NEC-SE-CG (2015) estipula que la velocidad para el diseño estructural no será menor a 21m/s (75km/h).



**Figura 118.** Velocidad anual media del viento a 10 m de altura  
Fuente: MEER (2014)

### 6.5.2.2. Velocidad corregida del viento

La velocidad instantánea máxima del viento será afectada por un coeficiente de corrección  $\sigma$ , el mismo que depende de la altura y las características topográficas o de edificación del sector o zona de construcción (nivel de exposición al viento) a través de la Ecuación (23) según la NEC-SE-CG (2015),

$$Vb = V * \sigma \quad (23)$$

donde  $Vb$  es la velocidad corregida del viento en (m/s),  $V$  es la velocidad instantánea máxima de viento en (m/s) registrada a 10 m de altura sobre el terreno,  $\sigma$  es el coeficiente de corrección (ver Tabla 58).

**Tabla 58**

*Coeficiente de corrección  $\sigma$*

Altura(m)	Sin obstrucción Categoría A	Obstrucción baja Categoría B	Zona edificada Categoría C
5	0,91	0,86	0,80
10	1,00	0,90	0,80
20	1,06	0,97	0,88
40	1,14	1,03	0,96
80	1,21	1,14	1,06
120	1,28	1,22	1,15

\*A: Sin obstrucción. Edificios frente al mar, zonas rurales o espacios abiertos sin obstáculos topográficos.

\*B: Obstrucción baja. Edificios en zonas suburbanas con edificación de baja altura hasta 10 m.

\*C: Zona edificada. Zonas urbanas con edificios de altura

Fuente: NEC-SE-CG (2015)

*Altura de la vivienda N° 1 = 5,80 m*

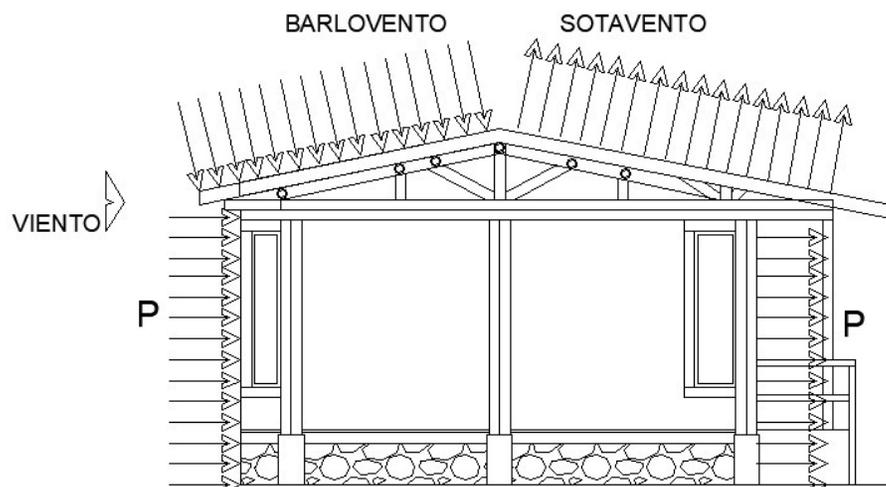
*Categoría B porque la obstrucción es baja en el sector de Quevedo*

$$Vb = 21 \frac{m}{s} * 0,86$$

$$Vb = 17,91 \frac{m}{s}$$

### 6.5.2.3. Cálculo de la presión del viento

A continuación se analizará la acción del viento en una vivienda, se puede observar en la Figura 119 el impacto que provoca el barlovento (viento de presión) y el sotavento (viento de succión) en las cubiertas y columnas.



**Figura 119.** Presión del viento (barlovento y sotavento) en una vivienda.

La acción del viento sobre los elementos de fachada se analiza a través de la Ecuación (24) que propone la NEC-SE-CG (2015),

$$P = \frac{1}{2} * \rho * Vb^2 * C_e * C_f \quad (24)$$

donde  $P$  es la presión expresada en ( $\text{N/m}^2$ ),  $Vb$  es la velocidad corregida del viento en ( $\text{m/s}$ ),  $\rho$  es la densidad del aire en ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_e$  es el coeficiente de entorno altura (ver Tabla 59),  $C_f$  es el coeficiente de forma (ver Tabla 60)

**Tabla 59***Coefficiente de entorno altura ( $C_e$ )*

<b>Construcción</b>	<b>Coefficiente <math>C_e</math></b>
Elementos de patios interiores, cuyo ancho es inferior a la altura del edificio y sin conexión con el espacio exterior por su parte inferior, ventanas interiores.	0,3
Fachadas protegidas en edificios alienados a calles rectas, a una distancia de la esquina mayor que la altura la edificación, en bloques exentos en la parte central de una fachada también patios de manzana.	0,8
Elementos de fachadas expuestas en edificaciones aisladas o fachadas de longitud menor que el doble de la altura.	1,3
Elementos en fachadas muy expuestas, situados al borde de la orilla de lagos o del mar, próximos a escarpaduras, laderas de fuerte inclinación, desfiladeros, y otros.	1,5

Fuente: NEC-SE-CG (2015)

**Tabla 60***Coefficiente de forma ( $C_f$ )*

<b>Construcción</b>	<b>Barlovento</b>	<b>Sotavento</b>
Superficies verticales de edificios.	0,8	
Anuncios, muros aislados; elementos con una dimensión corta.	1,5	
Tanques de agua, chimeneas y secciones circular o elíptica.	0,7	
Tanques de agua, chimeneas y secciones cuadradas o rectangulares.	2	
Arcos y cubiertas cilíndricas con ángulo de inclinación no mayor a 45°.	0,8	-0,5
Superficies inclinadas a 15° o menos.	0.3 a 0	-0,6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°.	0.3-0.7	-0,6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical.	0,8	-0,6

Fuente: NEC-SE-CG (2015)

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$C_e = 1,30$$

$$C_f = +0,30/-0,60 \text{ Superficie inclinada tiene } 13^\circ$$

### Barlovento

$$P = \frac{1}{2} * 1,25 * 17,91^2 * 1,30 * 0,30$$

$$P = 78,20 \frac{N}{m^2} \cong 7,97 \frac{kg}{m^2} \text{ Carga de viento en presión para la cubierta}$$

### Sotavento

$$P = \frac{1}{2} * 1,25 * 17,91^2 * 1,30 * -0,60$$

$$P = -156,40 \frac{N}{m^2} \cong -15,94 \frac{kg}{m^2} \text{ Carga de viento en succión para la cubierta}$$

#### 6.5.2.4. Resultados de cargas en barlovento y sotavento

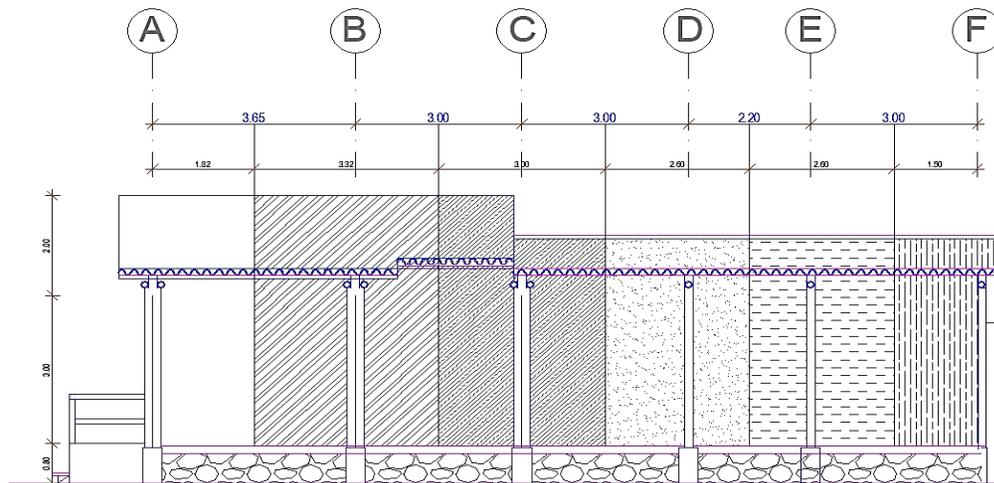
Para diseñar independientemente la carga de viento que se distribuye a los elementos de fachada y cubierta de la vivienda se procede a aplicar un coeficiente de modificación por altura en la que se encuentra el elemento estructural de análisis (ver Tabla 61). La Figura 120 muestra la distribución de la carga del viento por ancho cooperante en columnas y cubiertas, especificando la altura a la que se deberá aplicar los coeficientes para la presión del viento, finalmente se obtiene en la Tabla 62 los resultados de carga horizontal para la vivienda de análisis.

#### Tabla 61

*Coficiente de modificación por altura*

Coficiente para P	Altura de la edificación
0,99 <sup>2</sup>	H ≤ 3 m
1,05 <sup>2</sup>	3 m ≤ H ≤ 5 m
1,12 <sup>2</sup>	5 m ≤ H ≤ 10 m
1,16 <sup>2</sup>	10 m ≤ H ≤ 15 m
1,18 <sup>2</sup>	15 m ≤ H ≤ 20 m
1,22 <sup>2</sup>	20 m ≤ H ≤ 30 m

Fuente: González (2018)



**Figura 120.** Distribución de carga de viento por ancho cooperante en columnas y cubiertas de la vivienda N°1 (fachada lateral)

**Tabla 62**

*Resultados de carga horizontal (presión del viento) en columnas y cubiertas*

Ejes de columnas	Ancho cooperante Ac (m)	Columnas		Cubierta II	
		Barlovento kg/m	Cubierta I kg/m	Sotavento kg/m	Cubierta I kg/m
Pórtico A	1,82	14,22	16,00	-28,44	-31,99
Pórtico B	3,32	25,94	29,18	-51,88	-58,36
Pórtico C	3,00	23,44	26,37	-46,88	-52,73
Pórtico D	2,60	20,31	22,85	-40,63	-45,70
Pórtico E	2,60	20,31	22,85	-40,63	-45,70
Pórtico F	1,50	11,72	13,18	-23,44	-26,37

### 6.5.3. Carga Sísmica

Se analizó la estructura para cargas laterales estáticas mediante cálculo espectral, de acuerdo a la recomendación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de Diseño Sismo Resistente (NEC-SE-CG, 2015). El espectro elástico de respuesta sísmica se lo obtiene a través de los datos del tipo suelo y peligro sísmico del sector donde se pretende realizar la construcción, la NEC-SE-CG (2015) establece en su documento oficial los valores asignados a cada factor de análisis propuesto en la Tabla 63; por otro lado, en la misma normativa se

formulan las Ecuaciones (25), (26), (27) y (28) que permiten calcular el espectro de diseño por el Método 1 basado en fuerzas.

**Tabla 63***Espectro elástico de diseño en aceleraciones (NEC-SE-DS, 2015)*

Parámetro	Variable	Valor	Unidades	Referencia
Factor de importancia	<b>I</b>	1,00	s.u	Tabla 6, sección 4.1
Factor de reducción de respuesta	<b>R</b>	2,00	s.u	sección 6.3.3 (b)
Zonificación sísmica	<b>IV</b>			
Región del Ecuador	Quevedo, Los Ríos			
Factor de aceleración de la zona sísmica	<b>Z</b>	0,35	s.u	Tabla 1, sección 3.1.1
Relación de amplificación espectral	<b>n</b>	1,80	s.u	sección 3.3
Coefficiente Ct	<b>Ct</b>	0,055	s.u	sección 6.3.3 (a)
Altura total del elemento	<b>hn</b>	21,00	m	sección 6.3.3 (a)
Coefficiente para cálculo de periodo	<b>α</b>	0,90	s.u	sección 6.3.3 (a)
Tipo de suelo	<b>C</b>			
Factor de sitio Fa	<b>Fa</b>	1,23	s.u	Tabla 3, sección 3.2.2 ( a )
Factor de sitio Fd	<b>Fd</b>	1,15	s.u	Tabla 4, sección 3.2.2 ( b )
Factor de comportam. inelástico suelo	<b>Fs</b>	1,06	s.u	Tabla 5, sección 3.2.2 ( c )
Factor asociado al periodo de retorno	<b>r</b>	1,00	s.u	sección 3.3
Factor de irregularidad en planta	<b>Øp</b>	0,90	s.u	sección 5.2.1
Factor de irregularidad en elevación	<b>Øe</b>	1,00	s.u	sección 5.2.1
Aceleración de la gravedad	<b>g</b>	9,81	m/s <sup>2</sup>	
Período teórico método 1	<b>T1</b>	0,852	s	sección 3.4.2
Período teórico método 1 mayorado	<b>T2</b>	1,107	s	sección 3.4.2
Período fundamental dirección x	<b>Tx</b>	0,292	s	ETABS
Período fundamental dirección y	<b>Ty</b>	0,291	s	ETABS
Periodo límite en T=To	<b>To</b>	0,099	s	sección 3.3.1
Periodo límite T= Tc	<b>Tc</b>	0,545	s	sección 3.3.1
Periodo límite en T=TL	<b>TL</b>	2,760	s	sección 3.3.1
Aceleración en T=0	<b>Sa</b>	0,431	g	sección 3.3.1
Aceleración en T=To	<b>Sao</b>	0,775	g	sección 3.3.1

$$Sa = n * z * Fa \quad (25)$$

$$To = 0,10 * Fs * \frac{Fd}{Fa} \quad (26)$$

$$Tc = 0,55 * Fs * \frac{Fd}{Fa} \quad (27)$$

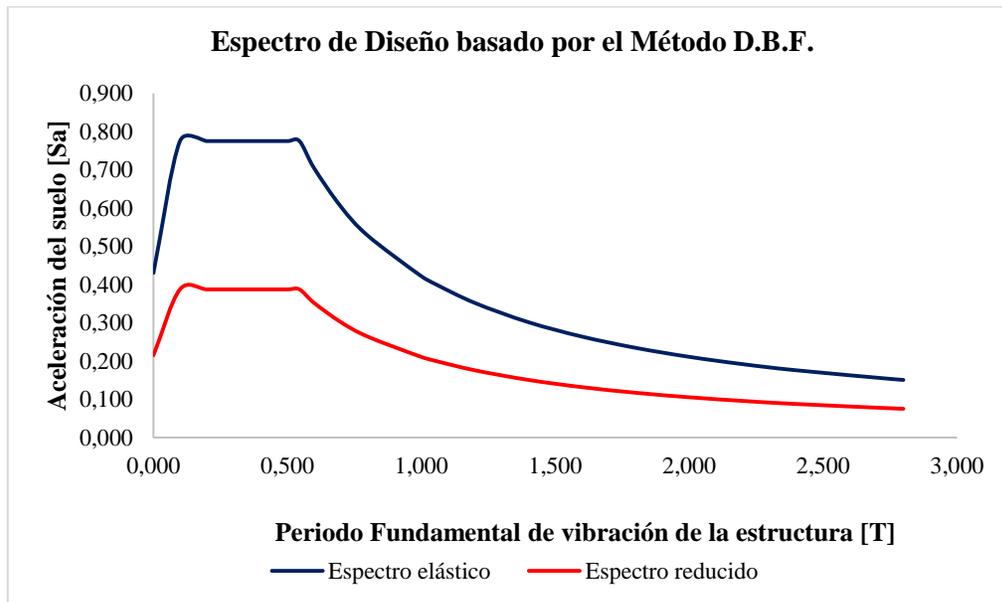
$$Sa = n * z * Fa * \left(\frac{Tc}{T}\right)^r \quad (28)$$

Para el caso de la vivienda N°1 – prototipo social, el suelo de la ciudad de Quevedo, Los Ríos, fue considerado tipo C; bajo esos parámetros y mediante los datos obtenidos en la Tabla 64 [producto del análisis conjunto de la Tabla 63 y las Ecuaciones (25), (26), (27) y (28)], se ha generado en la Figura 121 el espectro reducido (espectro de diseño) que relaciona la aceleración del suelo versus el periodo de vibración de la estructura modelada.

**Tabla 64**

*Espectro de diseño por el Método 1 basado en fuerzas (D.B.F.)*

T (s)	ESP. ELÁSTICO		ESP. REDUCIDO		
	Sa (g)	Sa (m/s <sup>2</sup> )	Sa (g)	Sa (m/s <sup>2</sup> )	
0,000	0,431	4,223	0,215	2,112	
To	0,099	0,775	7,602	0,387	3,801
	0,200	0,775	7,602	0,387	3,801
	0,300	0,775	7,602	0,387	3,801
	0,400	0,775	7,602	0,387	3,801
	0,500	0,775	7,602	0,387	3,801
Tc	0,545	0,775	7,602	0,387	3,801
	0,600	0,704	6,906	0,352	3,453
	0,700	0,603	5,919	0,302	2,960
	0,800	0,528	5,179	0,264	2,590
	0,994	0,425	4,169	0,212	2,084
	1,053	0,401	3,935	0,201	1,968
	1,200	0,352	3,453	0,176	1,726
	1,400	0,302	2,960	0,151	1,480
	1,600	0,264	2,590	0,132	1,295
	1,800	0,235	2,302	0,117	1,151
	2,000	0,211	2,072	0,106	1,036
	2,200	0,192	1,883	0,096	0,942
	2,400	0,176	1,726	0,088	0,863
TL	2,760	0,153	1,501	0,077	0,751
	2,800	0,151	1,480	0,075	0,740



**Figura 121.** Espectro elástico y espectro reducido (diseño) graficados para el análisis sísmico de la estructura

### 6.5.3.1. Cortante basal de diseño (V)

Para calcular el cortante basal del diseño se procede a utilizar los lineamientos de la NEC-SE-DS 2015, a través de la Ecuación (29). Los parámetros que inciden se los ha definido en la Tabla 63,

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R * \phi_P * \phi_E} * W \quad (29)$$

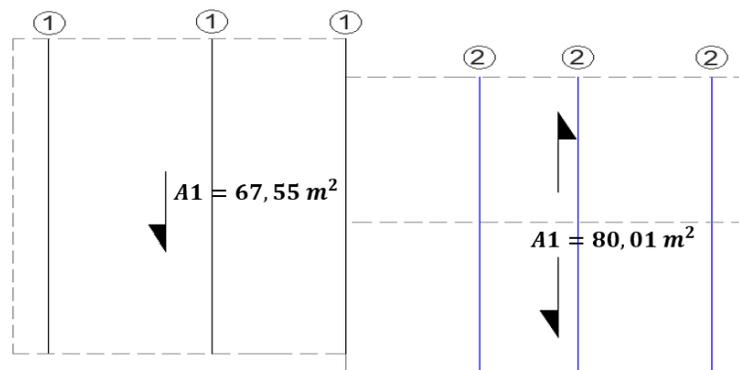
Donde  $V$  es el cortante basal que permitirá tener un coeficiente para el sismo elástico de respuesta y  $W$  es la carga sísmica reactiva.

$$V = \frac{1 * 0,775}{2 * 0,9 * 1} W$$

$$V = 0,4305 * W$$

### 6.5.4. Diseño de cubierta

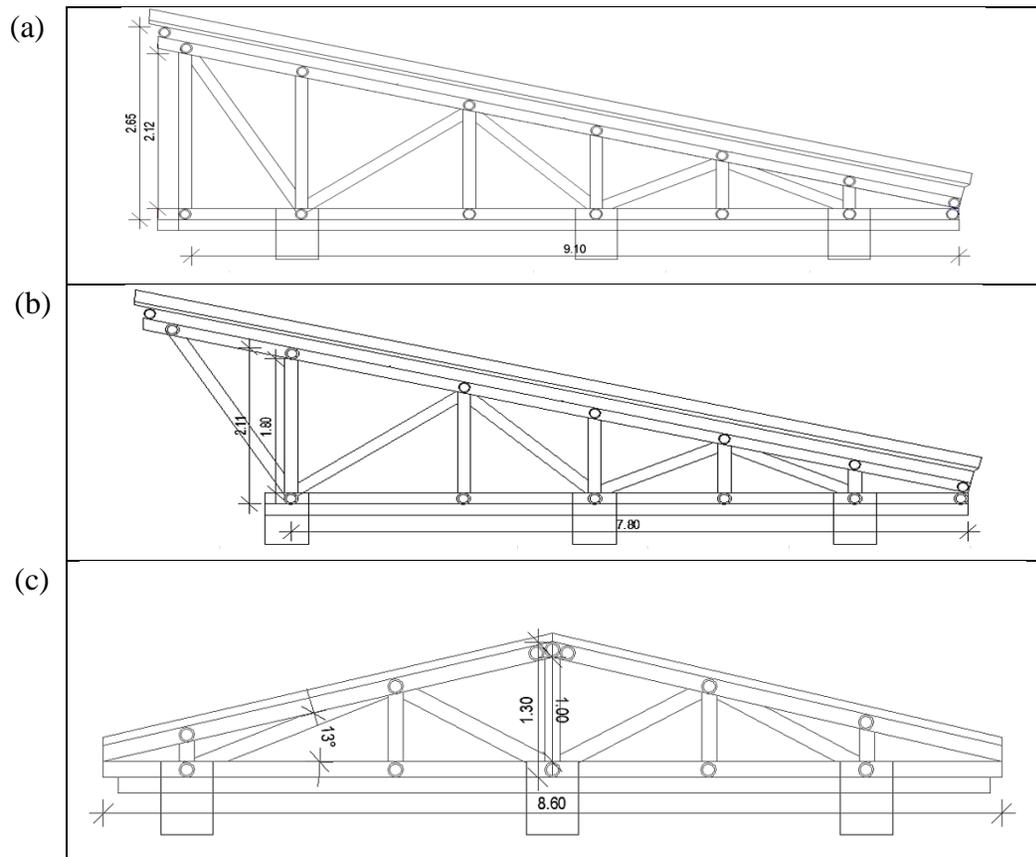
Para iniciar con el diseño de cubierta será necesario conocer las dimensiones de este elemento, el cual cuenta con un área total de  $151,45 \text{ m}^2$ , subdividido en dos zonas características; (i) la primera pertenece a un tipo de cubierta de una sola caída (área de  $71,40 \text{ m}^2$ ) ubicada aproximadamente en la mitad frontal de la vivienda (incluye ambiente social, comedor y cocina) permitiendo una alta ventilación; por otro lado (ii) la segunda es una cubierta de doble caída (área de  $80,02 \text{ m}^2$ ) ubicada en la mitad posterior de la vivienda (incluye hall y dormitorios), logrando un ambiente más cálido y confortable para los sectores de descanso (ver Figura 122).



**Figura 122.** Disposición de la cubierta de la vivienda social

#### 6.5.4.1. Tipos de celosías

En esta vivienda se han diseñado 3 tipos de celosías, una para cada tipo de cubierta (1 y 2 caídas) y una adicional en la zona de transición de las mismas, ubicadas en orden desde la parte frontal hasta la posterior (ver Figura 123). El ángulo de inclinación de todas las celosías bordean los  $13^\circ$  (equivalente a una pendiente al 23%).



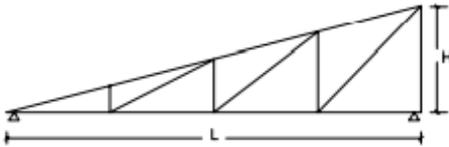
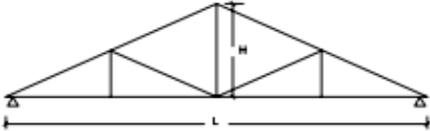
**Figura 123.** Tipos de celosías para la cubierta de la vivienda social (a) celosía monopitch tipo I, (b) celosía monopitch tipo II (transición) y (c) celosía howe

El análisis previo que se les realizó a cada celosía es un chequeo en su sistema estructural, el cual permitió evaluar si su configuración cumple con los estándares de inclinación, alturas máximas y luces aceptables para su óptima funcionalidad en cuanto a resistencia de esfuerzos axiales y perpendiculares. La Tabla 65 permitió analizar éstos elementos de cubierta, destacando que las celosías monopitch [ver Figura 123 (a) y (b)] cumplieron con alturas máximas (2,65 y 2,11 m, respectivamente) mayores a los 0,91 m establecidos por la JUNAC (1984); de igual manera la celosía howe [ver Figura 123 (c)] con una altura de 1,30 m sobrepasa la altura mínima de 0,86 m que establece

la JUNAC (1984). Por otro lado todas las celosías cumplen con la inclinación adecuada (mayor a 12°) y las luces permitidas (entre 7,50 y 30 m).

**Tabla 65**

*Chequeo del sistema estructural e inclinación de las celosías*

Sistema estructural	Altura mínima	Ángulos	Luces habituales (m)
	$H \geq L/10$	12-30°	7.5-35
	$H \geq L/10 - L/8$	12-30°	7,5-30

Adaptado de JUNAC (1984)

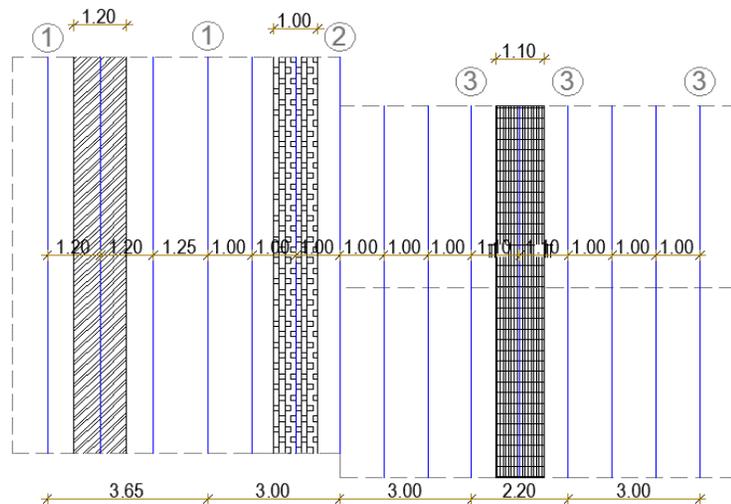
#### 6.5.4.2. Elementos de cubierta

La estructura de la cubierta se conformará por el conjunto de celosías propiamente arriostradas que permitan una completa funcionalidad mecánica ante las cargas actuantes provocadas por los elementos utilizados, éstos son: esterilla de bambú, lámina impermeabilizante Techofielt 2000, mortero de hormigón armado, membrana asfáltica con gravilla, cemento asfáltico FT-SYP-04M, accesorios para canaletas e instalaciones de iluminación y la sobrecarga (carga temporal).

#### 6.5.4.3. Análisis de cargas

Para este análisis fue necesario compilar información del peso que provoca la carga permanente (perteneciente a todos los materiales utilizados en la cubierta) y la carga temporal (perteneciente a la sobrecarga) que actúan sobre cada celosía de acuerdo a la distribución de carga asignada por el ancho cooperante al que fueron dispuestas

cada una (desde 1,00 m hasta 1,20 m); bajo estas consideraciones se obtuvo un total de 7 celosías del tipo monopitch (4 completas más 3 de transición) y 8 celosías del tipo howe (ver Figura 124)



**Figura 124.** Distribución de cargas en celosías analizando sus anchos cooperantes

- Correas para arriostamiento = 4,00 kg/m<sup>2</sup>
- Esterilla de bambú = 20,00 kg/m<sup>2</sup>
- Lámina impermeabilizante Techofielt 2000 = 2,60 kg/m<sup>2</sup>
- Mortero de hormigón armado = 88,00 kg/m<sup>2</sup>
- Membrana asfáltica con gravilla = 5,00 kg/m<sup>2</sup>
- Cemento asfáltico FT-SYP-04M = 1,00 kg/m<sup>2</sup>
- Accesorios para canaletas = 0,15 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones de iluminación = 5,00 kg/m<sup>2</sup>
- Carga temporal = 100,00 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 225,75 kg/m<sup>2</sup>**

**Peso propio de riostras de bambú = 4,45 kg/m<sup>2</sup>**

#### 6.5.4.4. Control de diseño

A continuación se procederá a realizar el control de diseño de los 3 tipos de celosías utilizando el ancho cooperante más crítico para cada uno. Consecuentemente se evaluarán las cargas axiales de compresión y tracción a las que están sometidos sus miembros internos mediante un conjunto de pasos de diseño para chequear esbeltez, momentos resistentes y esfuerzos admisibles.

**Celosía monopitch – tipo I:** En esa celosía se tomó un ancho cooperante de 1,20 m, calculando así la carga total que reposa sobre la estructura (WP) y simultáneamente el peso que incide del cordón inferior (WQ). La Figura 125 muestra las dimensiones de cada miembro que conforma este tipo de celosía, su esquema gráfico y las cargas actuantes como estructura total.

$$WP = \text{Carga total} * \text{ancho cooperante}$$

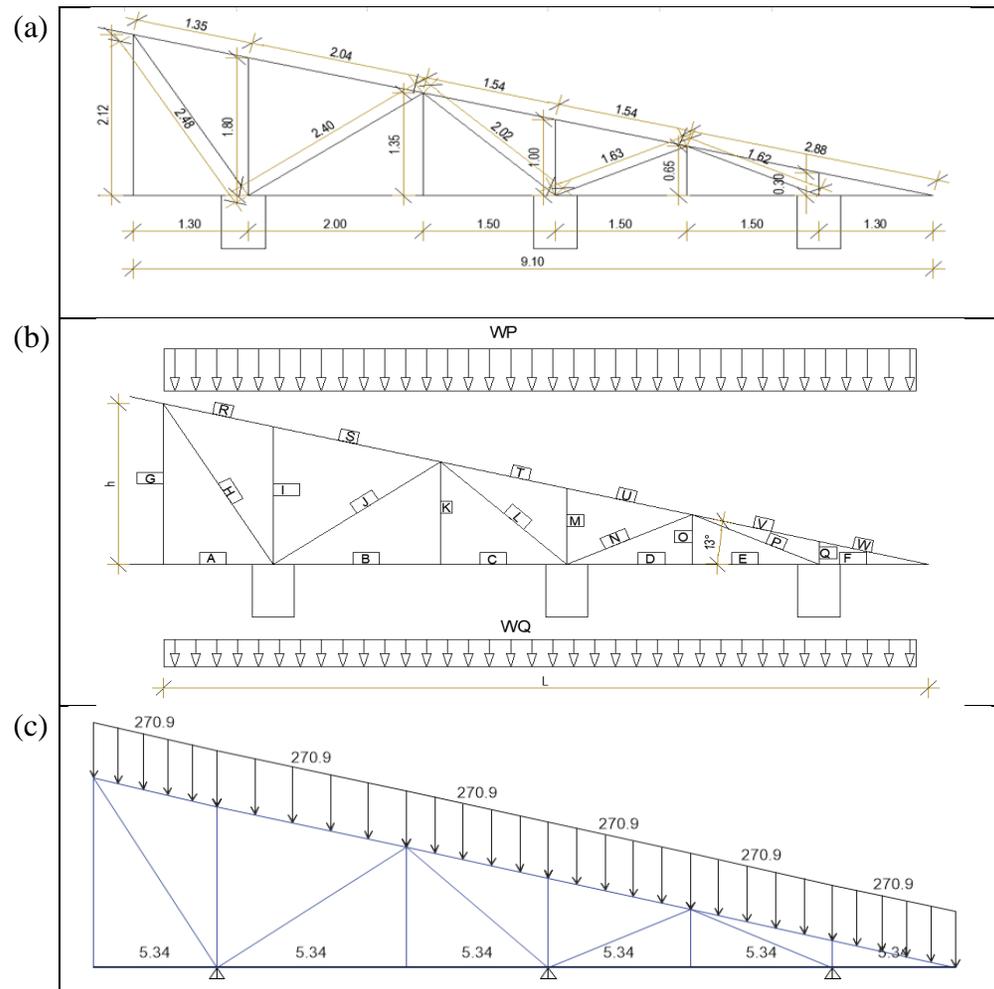
$$WP = 225,75 \frac{kg}{m^2} * 1,20 m$$

$$WP = 270,90 \frac{kg}{m}$$

$$WQ = \text{Peso propio riostras inferiores} * \text{ancho cooperante}$$

$$WP = 4,45 \frac{kg}{m^2} * 1,20 m$$

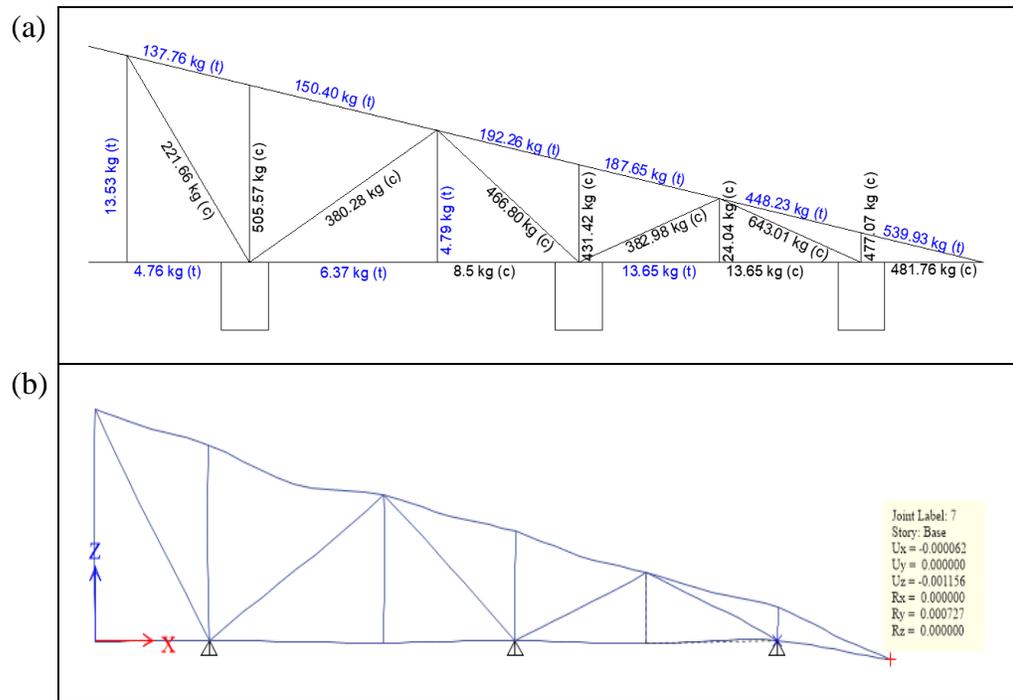
$$WP = 5,34 \frac{kg}{m}$$



**Figura 125.** Celosía monopitch tipo I cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural

Los resultados fueron obtenidos en programas estructurales como Ftools y Etabs, generando valores casi idénticos que corroboraron la veracidad de los cálculos manuales realizado por los autores; a continuación se muestra en la Figura 126 las cargas axiales de compresión o tracción a las que fueron sometidos los elementos que conforman la celosía (color azul: tracción y negro: compresión), evidenciando

virtualmente la deformación provocada por la carga ejercida sobre el elemento estructural de cubierta.



**Figura 126.** Resultados de las cargas actuantes en la celosía monopitch tipo I (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”, y (b) deformación de la estructura

En la Tabla 66 se ha compilado y distribuido por nomenclatura cada miembro que conforma la celosía [Figura 125 (b)] asignando sus valores obtenidos a tracción o compresión respectivamente; esto permitirá evaluar organizadamente cada elemento en los pasos de diseño.

**Tabla 66***Resumen de los miembros cargados de la celosía monopitch tipo I*

Miembro	Longitud m	Tracción (+) kgf	Compresión (-) kgf
A	1,3	4,76	
B	2	6,37	
C	1,5		8,50
D	1,5	13,65	
E	1,5		13,65
F	1,3		481,76
G	2,12	13,53	
H	2,48		221,66
I	1,8		505,57
J	2,4		380,28
K	1,35	4,79	
L	2,02		466,8
M	1		431,42
N	1,63		382,98
O	0,65		24,04
P	1,63		643,01
Q	0,3		477,07
R	1,35	137,76	
S	2,04	150,4	
T	1,54	192,26	
U	1,54	187,65	
V	1,54	448,23	
W	1,33	539,93	

Previo al diseño de cada miembro de celosía, se definirán que tipo de momentos actuantes poseen; para cuerdas superiores se calculará mediante la Ecuación (30), mientras que para cuerdas inferiores se procede a utilizar la Ecuación (31) según el Anexo 6 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino (armaduras),

$$M_{cs} = \frac{WP * L^2}{11} \quad (30)$$

$$M_{ci} = \frac{WQ * L^2}{8} \quad (31)$$

donde  $M_{cs}$  es el momento para cuerdas superiores en (kg-m),  $M_{ci}$  es el momento para cuerdas inferiores en (kg-m),  $WP$  carga total de cubierta sobre la celosía en (kg/m),  $WQ$  carga de riostras o cordones inferiores de la celosía en (kg/m),  $L$  longitud del elemento analizado en (m).

En base a lo acotado los elementos que utilizarán  $Mcs$  serán G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, y los que utilizarán  $Mci$  serán A, B, C, D y F.

### Evaluación para el miembro A (elemento traccionado)

**Paso 1:** Predimensionamiento del miembro

$$\text{Diámetro externo } (De) = 0,14 \text{ m}$$

$$\text{Espesor } (e) = 0,015 \text{ m}$$

$$\text{Longitud } (L) = 1,30 \text{ m}$$

$$\text{Inercia } (I) = 11670525,80 \text{ mm}^4$$

$$\text{Densidad básica } (\delta_b) = 686,04 \text{ kg/m}^3$$

**Paso 2:** Cálculo de los esfuerzos admisibles modificados para los ensayos de tracción, flexión y compresión influyentes en el diseño de los miembros de celosía (ver Tabla 67).

**Tabla 67**

*Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen*

Esfuerzos admisibles	$\sigma_{adm-trac}$	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$
		18,91	34,58
$C_D$	0,90	0,90	0,90
$C_m$	1,00	0,79	1,00
$C_t$	1,10	1,00	1,00
$C_F$	1,00	1,10	1,10
$C_L$	-	0,98	-
$C_r$	-	1,10	1,10
$C_p$	-	-	-
$C_c$	0,93	0,93	0,93
<b>Esfuerzos admisibles modificados</b>	$\sigma'_{adm-trac}$	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$
	17,47	27,20	32,14

**Paso 3:** Chequeo de elemento solicitado a tensión axial

$$\sigma_{trac} = \frac{T}{An} \leq \sigma'_{adm-trac}$$

$\sigma_{trac}$  = Esfuerzo de tracción actuante en MPa

$T$  = Fuerza de tracción aplicada en N

$An$  = Área neta del elemento en  $\text{mm}^2$

$\sigma'_{adm-trac} = \text{Esfuerzo de tracción admisible en MPa}$

$$An = \frac{\pi}{4} * (D_e^2 - (D_e - 2e)^2)$$

$$An = \frac{\pi}{4} * (140^2 - (140 - 2 * 15)^2)$$

$$An = 5890,49 \text{ mm}^2$$

$$T = 46,68 \text{ N}$$

$$\sigma_{trac} = \frac{46,68}{5890,49}$$

$$\sigma_{trac} = 0,0079246 \text{ MPa}$$

$$0,0079246 \text{ MPa} \leq 17,47 \text{ MPa} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 4:** Chequeo de elemento solicitado a compresión axial

$$Le = Lu * k$$

$Le = \text{Longitud efectiva del elemento en mm}$

$Lu = \text{Longitud no soportada lateralmente del elemento en mm}$

$k = \text{Coeficiente de longitud efectiva (ver Tabla 68)}$

**Tabla 68**

*Coeficiente de longitud efectiva*

Condición de los apoyos	k
Ambos extremos articulados (Ambos extremos del elemento deben estar restringidos al desplazamiento perpendicular a su eje longitudinal)	1.0
Un extremo con restricción a la rotación y al desplazamiento y el otro libre	2.1

Fuente: NSR (2010)

$$Le = 1300 * 1,0$$

$$Le = 1300 \text{ mm}$$

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

$\lambda$  = relación de esbeltez

$r$  = radio de giro de la sección en mm

$$r = \frac{\sqrt{(D_e^2 - (D_e - 2e)^2)}}{4}$$

$$r = \frac{\sqrt{(140^2 - (140 - 2 * 15)^2)}}{4}$$

$$r = 44,51 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{1300}{44,51}$$

$$\lambda = 29,21$$

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{MOE_{0.05}}{\sigma'_{adm-comp}}}$$

$C_k$  = límite entre columnas

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{23453,63}{32,14}}$$

$$C_k = 69,29$$

**Tabla 69**

*Clasificación de columnas por esbeltez*

Columna	Esbeltez
Corta	$\lambda < 30$
Intermedia	$30 < \lambda < C_k$
Larga	$C_k < \lambda < 150$

Fuente: NSR (2010)

El miembro A se clasifica como una **columna corta** según la Tabla 69

$$\sigma_{comp} = \frac{N}{An} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$\sigma_{comp}$  = Esfuerzo de compresión actuante en MPa

$N =$  Fuerza de compresión aplicada en  $N$

$A_n =$  Área neta del elemento en  $mm^2$

$\sigma'_{adm-compr} =$  Esfuerzo de compresión admisible en  $MPa$

$$\sigma_{comp} = \frac{46,68}{5890,49}$$

$$0,0079 \leq 32,14 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 5:** Chequeo de momento resistente. En este caso se trata de una cuerda inferior.

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{adm-flex}$$

$$M_{ci} = \frac{WQ * L^2}{8}$$

$$S = \frac{\pi * (D_e^4 - (D_e - 2e)^4)}{32 * D_e}$$

$\sigma_{flex} =$  Esfuerzo de flexión actuante en  $MPa$

$\sigma'_{adm-flex} =$  Esfuerzo de compresión admisible en  $MPa$

$M = M_{ci} =$  Momento actuante sobre el elemento en  $N - mm$

$S =$  Módulo de sección en  $mm^3$

$$M_{ci} = \frac{5,34 * L^2}{8} \text{ kgf} - m * 9806,65 (N - mm)$$

$$M_{ci} = 11062,64 N - mm$$

$$S = \frac{\pi * (140^4 - (140 - 2 * 15)^4)}{32 * 140}$$

$$S = 166721,80 mm^3$$

$$\sigma_{flex} = \frac{11062,64}{166721,8}$$

$$\sigma_{flex} = 0,066 MPa$$

$$0,066 \leq 27,20 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo de elemento con sollicitación por flexión y carga axial

$$\frac{\sigma_{trac}}{\sigma'_{adm-trac}} + \frac{\sigma_{flex}}{\sigma'_{adm-flex}} \leq 1.0$$

$$\frac{0,00792}{17,47} + \frac{0,066}{27,20} \leq 1.0$$

$$0,00288 \leq 1.0 \text{ CUMPLE}$$

El mismo procedimiento se aplicó a cada elemento conformante de la celosía analizada y de igual manera a todos los miembros de las 2 celosías restantes, verificando su diseño por esfuerzos admisibles.

**Celosía monopitch – tipo II:** En esa celosía se tomó un ancho cooperante de 1,00 m, calculando así la carga total que reposa sobre la estructura (WP) y simultáneamente el peso que incide en el cordón inferior (WQ). La Figura 127 muestra las dimensiones de cada miembro que conforma este tipo de celosía, su esquema gráfico y las cargas actuantes como estructura total.

$$WP = C.Total * ancho cooperante$$

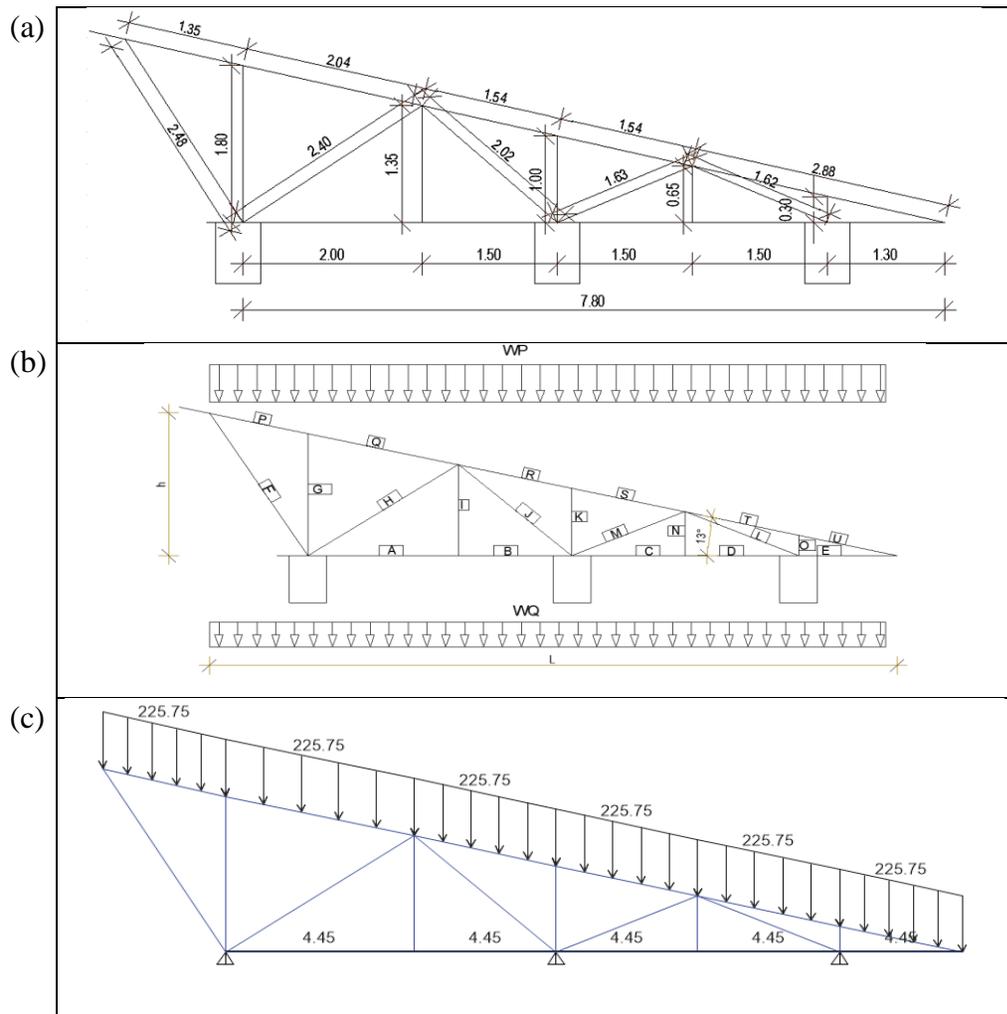
$$WP = 225,75 \frac{kg}{m^2} * 1,00 m$$

$$WP = 225,75 \frac{kg}{m}$$

$$WQ = PP riostras inferiores * ancho cooperante$$

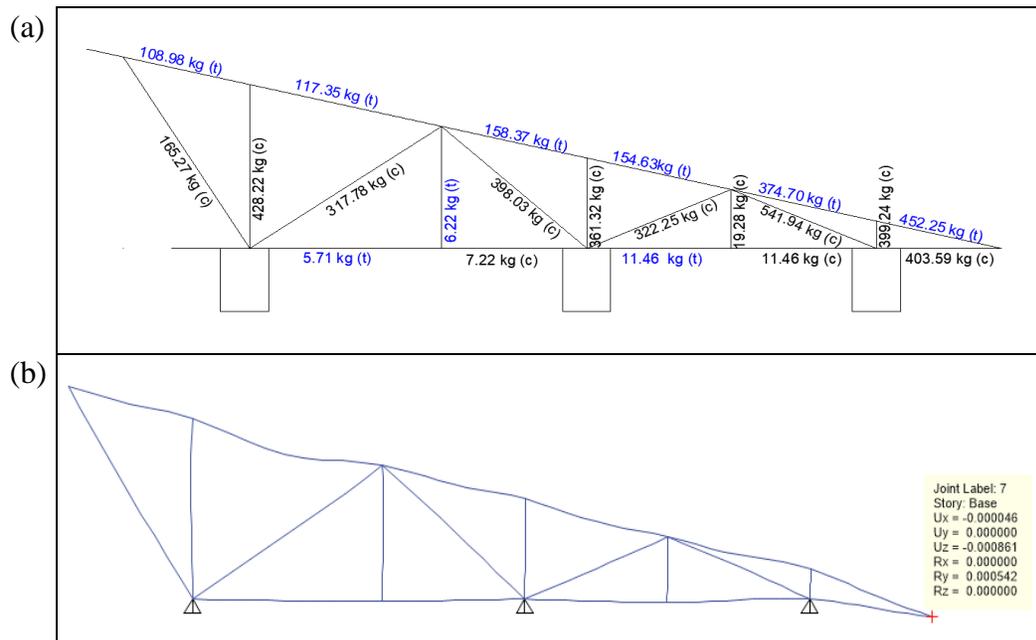
$$WP = 4,45 \frac{kg}{m^2} * 1,00 m$$

$$WP = 4,45 \frac{kg}{m}$$



**Figura 127.** Celosía monopitch tipo II cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural

A continuación se muestra en la Figura 128 las cargas axiales a compresión o tracción a las que fueron sometidos los elementos que conformaban la celosía (color azul: tracción y negro: compresión), evidenciando virtualmente la deformación provocada por la carga ejercida sobre el elemento estructural de cubierta.



**Figura 128.** Resultados de las cargas actuantes en la celosía monopitch tipo II  
 (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”,  
 y (b) deformación de la estructura

La Tabla 70 ha compilado y distribuido por nomenclatura cada miembro que conforma la celosía [ver Figura 127 (b)] asignando sus valores obtenidos a tracción o compresión respectivamente

**Tabla 70***Resumen de los miembros cargados de la celosía monopitch tipo II*

Miembro	Longitud m	Tracción (+) kg	Compresión (-) kg
A	2	5,71	
B	1,5		7,22
C	1,5	11,46	
D	1,5		11,46
E	1,3		403,59
F	2,48		165,27
G	1,8		428,22
H	2,4		317,78
I	1,35	6,22	
J	2,02		398,03
K	1		361,32
L	1,63		322,25
M	0,65		19,28
N	1,63		541,94
O	0,3		399,24
P	1,35	108,98	
Q	2,04	117,35	
R	1,54	158,37	
S	1,54	154,63	
T	1,54	374,7	
U	1,33	452,25	

**Celosía howe:** En esa celosía se tomó un ancho cooperante de 1,10 m, calculando así la carga total que reposa sobre la estructura (WP) y simultáneamente el peso que incide en el cordón inferior (WQ). La Figura 129 muestra las dimensiones de cada miembro que conforma este tipo de celosía, su esquema gráfico y las cargas actuantes como estructura total.

$$WP = C. Total * ancho cooperante$$

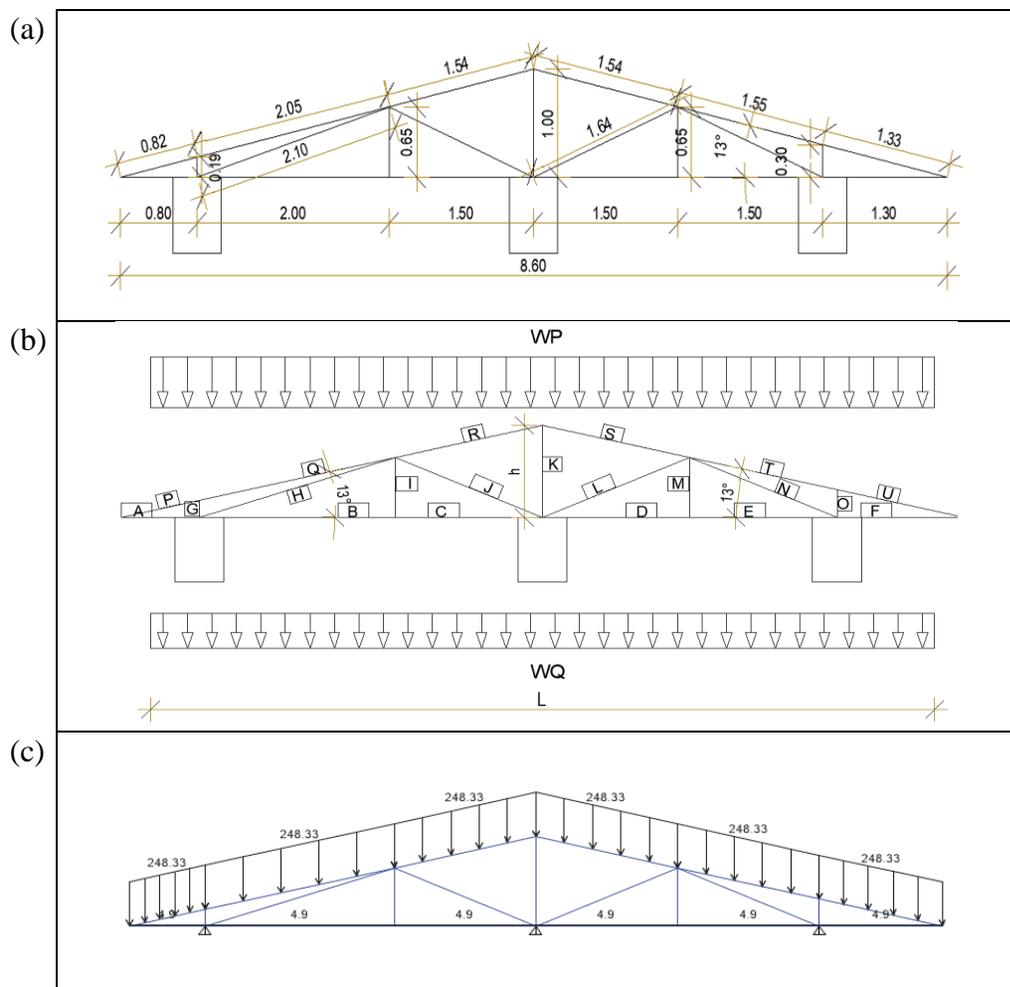
$$WP = 225,75 \frac{kg}{m^2} * 1,10 m$$

$$WP = 248,33 \frac{kg}{m}$$

$$WQ = PP riostras inferiores * ancho cooperante$$

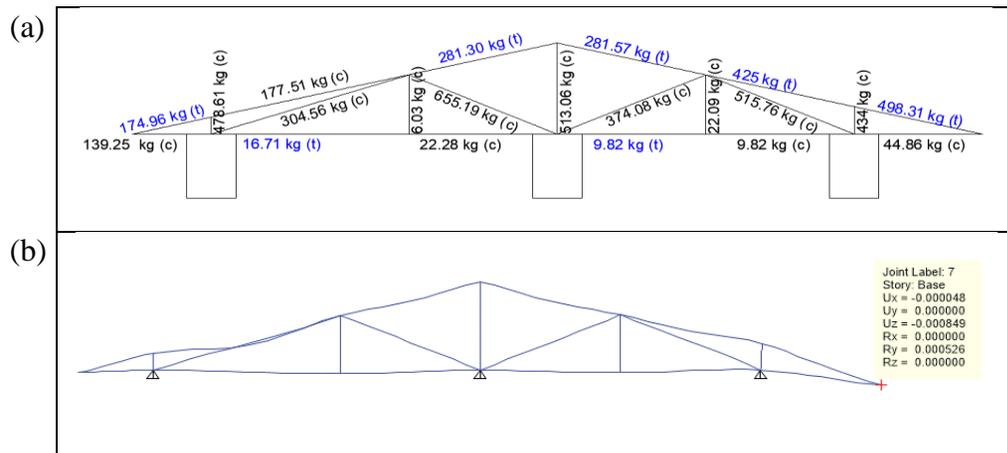
$$WP = 4,45 \frac{kg}{m^2} * 1,10 m$$

$$WP = 4,90 \frac{kg}{m}$$



**Figura 129.** Celosía howe cargada con el peso de cubierta calculado (a) dimensionamiento de los miembros que conforman la estructura, (b) esquema gráfico de carga, y (c) estructura modelada en programa de cálculo estructural

A continuación se muestra en la Figura 130 las cargas axiales a compresión o tracción a las que fueron sometidos los elementos que conformaban la celosía (color azul: tracción y negro: compresión), evidenciando virtualmente la deformación provocada por la carga ejercida sobre el elemento estructural de cubierta.



**Figura 130.** Resultados de las cargas actuantes en la celosía howe (a) desglose de elementos sometidos a tracción “t” y compresión “c”, y (b) deformación de la estructura

En la Tabla 71 se ha compilado y distribuido por nomenclatura cada miembro que conforma la celosía [Figura 129 (b)] asignando sus valores obtenidos a tracción o compresión respectivamente.

**Tabla 71**

*Resumen de los miembros cargados de la celosía howe*

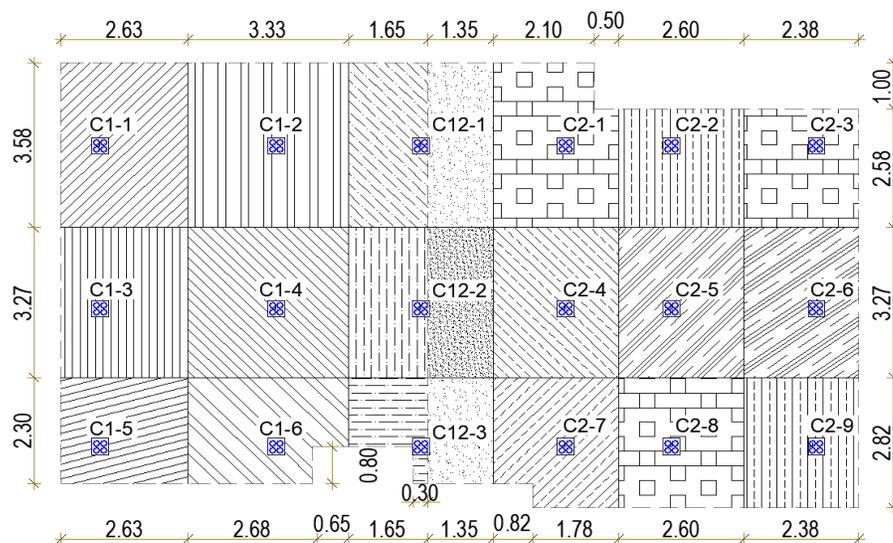
Miembro	Longitud m	Tracción (+) kg	Compresión (-) kg
A	0,8		139,25
B	2	16,71	
C	1,5		22,28
D	1,5	9,82	
E	1,5		9,82
F	1,3		44,86
G	0,19		478,61
H	2,1		304,56
I	0,65		6,03
J	1,64		655,19
K	1		513,06
L	1,64		374,08
M	0,65		22,09
N	1,64		515,76
O	0,3		434
P	0,82	174,96	
Q	2,05		177,51
R	1,54	281,3	
S	1,54	281,57	
T	1,54	425	
U	1,33	498,31	

### 6.5.5. Diseño de columnas

La vivienda tipo N°1 indicó en sus planos arquitectónicos que estará conformada por 18 columnas de bambú, mismas que teóricamente podrían estar compuestas de 1 o más culmos en función de sus cargas aplicadas y de los esfuerzos flexo-compresivos que incurran en la estructura. Para el diseño de estos elementos estructurales se utilizó los lineamientos que propone la Norma Técnica E.100 Bambú. Perú, como también el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente a razón de ser los documentos oficiales más completos en relación al cálculo y control de diseño para estructuras de bambú.

#### 6.5.5.1. Predimensionamiento de columnas

Para iniciar con el diseño de las columnas es importante predimensionar este elemento estructural a través de un análisis de áreas cooperantes dentro de la estructura vista en planta (ver Figura 131), lo cual permite analizar la distribución de cargas gravitatorias que actuarán en cada una de las columnas que se proponga.



**Figura 131.** Distribución de carga sobre columnas por análisis de área cooperante

### 6.5.5.2. Análisis y distribución de cargas

Calcular el peso propio de armadura de cubierta (celosías, sección 6.5.4.1, ver Tabla 72).

**Tabla 72**

*Peso propio de las celosía*

Tipo de celosía	Peso propio kg	Cantidad #	Peso propio total kg
Monopitch I	140,27	4	561,08
Monopitch II	127,93	3	389,79
Howe	105,47	8	843,76

$$\text{Área total de cubierta} = 147,56 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso de armadura por m}^2 = \frac{561,08 + 389,79 + 843,76 \text{ kg}}{147,56 \text{ m}^2}$$

$$\text{Peso de armadura por m}^2 = 12,16 \text{ kg/m}^2$$

***Peso total que aporta la cubierta***

$$\text{Peso total de cubierta} = \text{Peso de materiales} + \text{p.p. de armadura}$$

$$\text{Peso total de cubierta} = 225,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 12,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Peso total de cubierta} = 237,91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Propuesta de tipo/s de columnas (configuración por el número de culmos).

Después del análisis de carga por área cooperante se procede a determinar una clasificación inicial de columnas para el prediseño (ver Tabla 73).

**Tabla 73***Clasificación de las columnas por carga axial en el prediseño*

Columnas	Área de aporte m <sup>2</sup>	Fuerza axial (F1) kgf	Ubicación de las columnas	Clasificación por prediseño
C1-1	9,42	2240,04	Esquinera	Tipo I
C1-2	11,92	2836,24	Intermedia	Tipo II
C1-3	8,60	2046,07	Central	Tipo II
C1-4	10,89	2590,65	Central	Tipo II
C1-5	6,05	1439,13	Esquinera	Tipo I
C1-6	7,14	1698,45	Intermedia	Tipo II
C12-1	10,74	2555,18	Intermedia	Tipo II
C12-2	9,81	2333,92	Central	Tipo II
C12-3	5,82	1384,65	Intermedia	Tipo II
C2-1	9,31	2214,49	Intermedia	Tipo II
C2-2	6,71	1595,91	Intermedia	Tipo II
C2-3	8,48	2018,59	Esquinera	Tipo I
C2-4	8,50	2022,73	Central	Tipo II
C2-5	8,50	2022,73	Central	Tipo II
C2-6	7,75	1843,79	Central	Tipo II
C2-7	7,48	1779,01	Intermedia	Tipo II
C2-8	7,33	1744,37	Intermedia	Tipo II
C2-9	6,71	1596,77	Esquinera	Tipo I

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

$\sigma =$  esfuerzo

$P =$  carga aplicada

$A =$  área de contacto

Se procede a analizar el área que soportaría la carga axial máxima calculada de la Tabla 73 (2836,24 kgf = 27823,51 N), si el esfuerzo admisible a compresión es 31,63 MPa (para la espécimen *D. asper*).

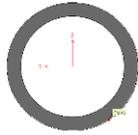
$$A = \frac{P}{\sigma}$$

$$A = \frac{27823,51 \text{ N}}{31,63 \text{ N/mm}^2}$$

$$A = 879,66 \text{ mm}^2$$

### 6.5.5.3. Tipos de columnas

#### 1 culmo de bambú



$$\text{Diámetro externo } (D_e) = 0,14 \text{ m} = 140 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor } (e) = 0,015 \text{ m} = 15 \text{ mm}$$

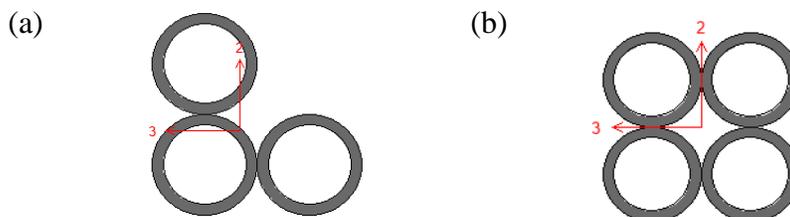
$$A_n = \frac{\pi}{4} * (D_e^2 - (D_e - 2e)^2)$$

$$A_n = \frac{\pi}{4} * (140^2 - (140 - 2 * 15)^2)$$

$$A_n = 5890,49 \text{ mm}^2 \gg 879,66 \text{ mm}^2$$

Teóricamente con un solo culmo de bambú la estructura estaría estructuralmente funcional, es decir, soportaría perfectamente las cargas axiales, pero en realidad no es así, ya que en la estructura incurren cargas horizontales críticas como la presión de viento y las sísmicas (estáticas/dinámicas), por lo cual las columnas además de ser chequeadas por carga gravitatoria deben ser diseñadas a flexo-compresión a través de un análisis completo de la interacción del material en conjunto con la estructura. Para esto, fue necesario modelar la vivienda en el programa Etabs que permite analizar la estructura de forma completa y determinar las cargas exactas que absorben las columnas propuestas. Por otro lado, las columnas en estructuras de bambú no pueden desarrollar su funcionamiento en un solo culmo y por normas de seguridad estructural (NSR, 2010) se establece que las columnas más recurrentes son de una configuración mínima de 3 culmos.

Para esta vivienda, inicialmente se definió columnas de 3 culmos para los sectores esquineros (Tipo I) y de 4 culmos para las columnas intermedias y centrales (Tipo II) y sus propiedades geométricas se las detalla en la Tabla 74 y Figura 132.



**Figura 132.** Configuración de columnas de (a) 3 culmos y (b) 4 culmos

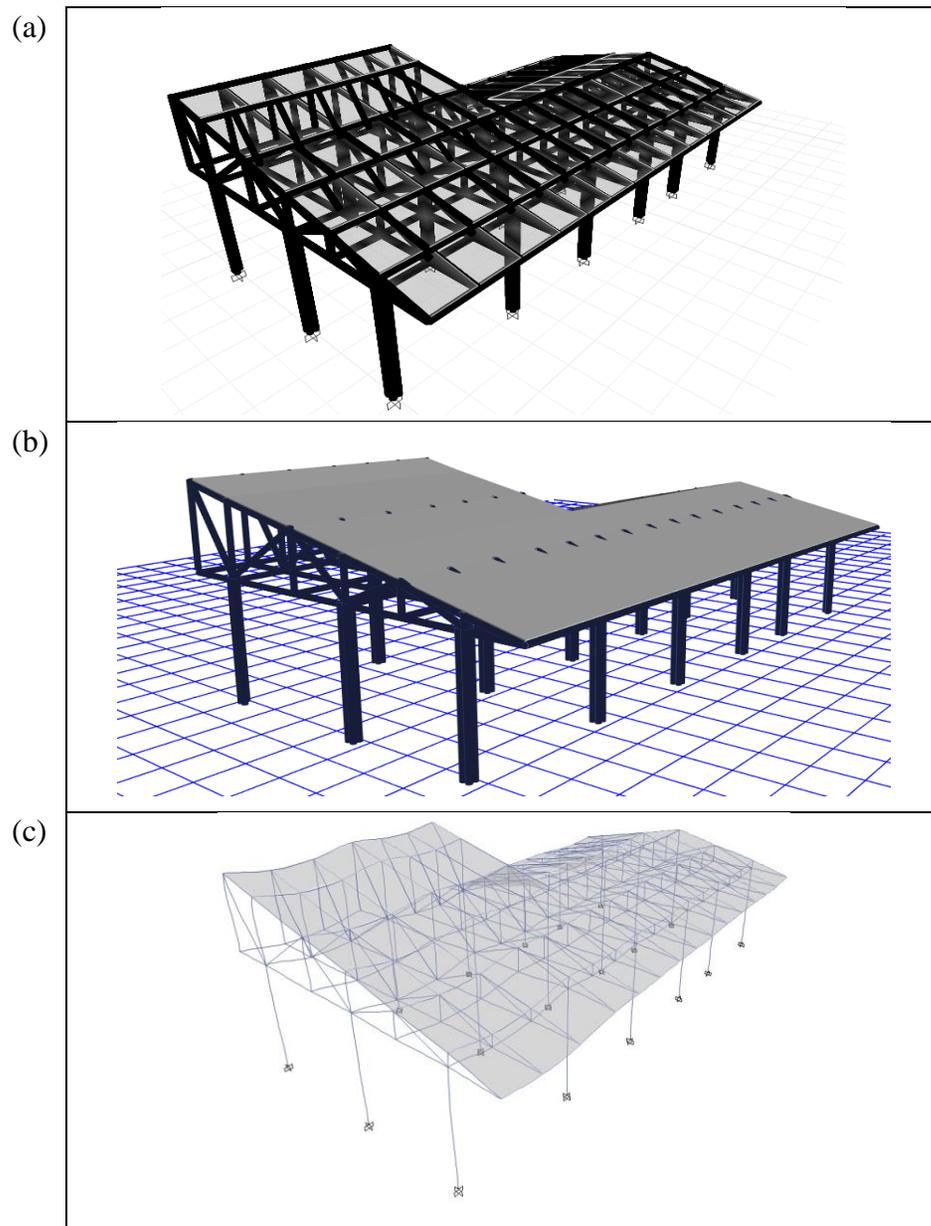
**Tabla 74**

*Propiedades geométricas de las configuraciones de 3 y 4 culmos*

Propiedades geométricas	3 Culmos	4 Culmos
Área (mm <sup>2</sup> )	17671,50	23561,90
Centroide Xc (mm)	46,70	70,00
Centroide Yc (mm)	46,70	70,00
Inercia Ixx (mm <sup>4</sup> )	111980597,50	162135633,40
Inercia Iyy (mm <sup>4</sup> )	73496087,50	162135633,40
Módulo de sección elástico Sxx (mm <sup>3</sup> )	959833,70	1158111,70
Módulo de sección elástico Syy (mm <sup>3</sup> )	685595,50	1158111,70
Módulo de sección plástico Zxx (mm <sup>3</sup> )	1150018,30	1638754,80
Módulo de sección plástico Zyy (mm <sup>3</sup> )	1150016,80	1638754,80

#### 6.5.5.4. Modelamiento Etabs

Análisis estructural de la vivienda. Se procede a modelar la vivienda total en Etabs para chequear que el prediseño estructural tenga la óptima funcionalidad estructural de acción conjunta (ver Figura 133).



**Figura 133.** Modelamiento estructural en Etabs (a) diseño de armadura por celosías, (b) carga de cubierta, y (c) respuesta mecánica de la estructura

Para el prediseño de la vivienda se procede a realizar un análisis estático modal espectral con el objetivo de verificar el porcentaje de participación de la masa en la estructura, la cual indica el sentido y dirección de movimiento (desplazamientos y torsión) que presenta el modelo ante las cargas aplicadas; para esto, se analiza sus

modos de vibración fundamentales 1°, 2°, 3°, mismos que evidenciarán el nivel de rigidez y confirmarán el comportamiento funcional de la estructura (NEC-SE-RE, 2015).

- 1° modo de vibración = desplazamiento en X o Y casi puro (aproximadamente 90%)
- 2° modo de vibración = desplazamiento en X o Y casi puro (aproximadamente 90%)
- 3° modo de vibración = torsión mayor o igual al 50% en Z

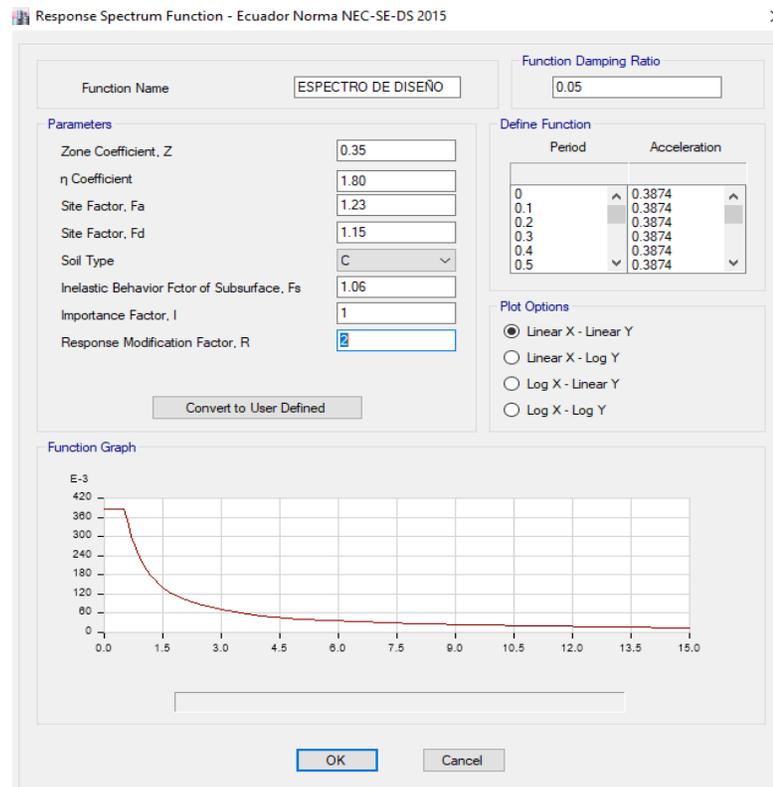
Bajo estos principios la estructura de la vivienda N°1 presentó resultados aceptables, sin embargo, los autores han decidido finalmente cambiar la geometría de las columnas esquineras por la configuración de 4 culmos, ya que fue evidente que las columnas de 3 culmos incidieron en que el desplazamiento lateral no haya sido puro en el sentido X, por tanto al rigidizar las columnas mencionadas se logra estabilizar toda la estructura disminuyendo el régimen torsional causado por fuerzas sísmicas en un 16,45% el en el 2° modo de vibración y aumentando el desplazamiento lateral común en ambos sentidos (ver Tabla 75).

**Tabla 75**

*Porcentaje de participación de masas de la estructura*

<b>Modelo con columnas de 3 y 4 culmos</b>		
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (%)</b>
6,81	<b>91,13</b>	2,08
<b>75,50</b>	8,83	15,8
17,70	0,05	<b>82,11</b>
Desplazamiento por sismo	Ex	10,42 mm
	Ey	9,73 mm
<b>Modelo con columnas de 4 culmos</b>		
0,23	<b>99,61</b>	0,15
<b>88,15</b>	0,34	11,62
11,62	0,04	<b>88,21</b>
Desplazamiento por sismo	Ex	9,81 mm
	Ey	9,33 mm





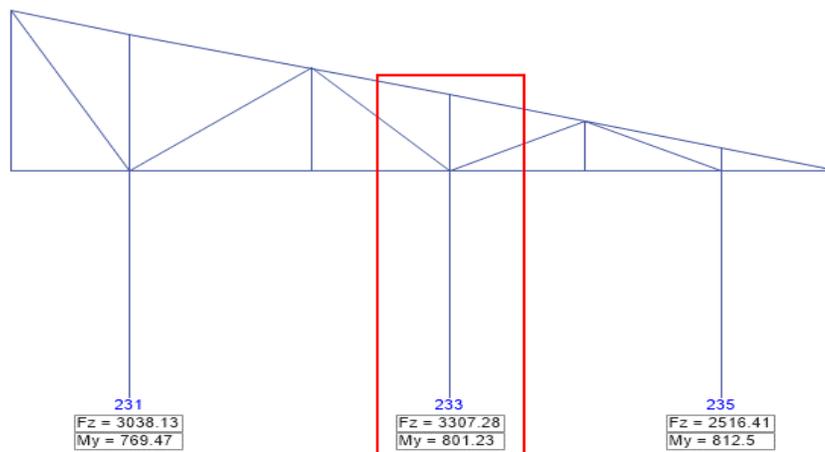
**Figura 135.** Espectro de respuesta generado por Etabs basado en la NEC-SE-DS-2015

**Paso 2:** Análisis de fuerzas y momentos actuantes en las columnas de la estructura.

En la Tabla 76 se puede verificar que las columnas de la ubicación C1-4 y C1-5 son las que poseen la mayor carga axial y el mayor momento actuante, por lo tanto el control de diseño se las realizará en ambas por contar con los valores más críticos a nivel estructural. El resto de elementos contiene cargas y momentos inferiores, por lo tanto, si las columnas C1-4 y C1-5 aprueban el chequeo por esbeltez y flexo-compresión, será suficiente para asumir que todas las columnas están en un correcto diseño por pertenecer a la misma configuración de culmos.

**Tabla 76***Carga Axial y Momento actuante en columnas*

Columnas	ETABS (C. Axial) kgf	ETABS (Momento) kgf-m	Clasificación Diseño -
C1-1	1661,07	886,97	4 culmos
C1-2	3038,13	769,47	4 culmos
C1-3	1699,39	930,33	4 culmos
C1-4	<b>3307,28</b>	801,23	4 culmos
C1-5	1416,73	<b>937,26</b>	4 culmos
C1-6	2516,41	812,50	4 culmos
C12-1	1947,22	711,00	4 culmos
C12-2	3182,01	732,84	4 culmos
C12-3	2050,05	742,60	4 culmos
C2-1	1517,57	677,46	4 culmos
C2-2	1500,61	640,54	4 culmos
C2-3	917,96	571,44	4 culmos
C2-4	2970,58	680,89	4 culmos
C2-5	3147,46	653,39	4 culmos
C2-6	1922,96	588,10	4 culmos
C2-7	1779,48	692,11	4 culmos
C2-8	1728,44	657,95	4 culmos
C2-9	1058,78	597,20	4 culmos

**COLUMNA C1-4****Figura 136.** Resultados de la carga actuante en la columna C1-4

**Paso 3:** Cálculo de los esfuerzos admisibles modificados y módulos de elasticidad de diseño en compresión y flexión (Ver Tabla 77).

**Tabla 77***Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen*

Esfuerzos admisibles	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$
		34,58 MPa
$C_D$	0,90	0,90
$C_m$	0,79	1,00
$C_t$	1,00	1,00
$C_F$	1,10	1,10
$C_L$	1,00	-
$C_r$	1,00	1,00
$C_p$	-	0,75
$C_c$	1,00	-
Esfuerzos admisibles modificados	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$
	27,13 MPa	29,67 MPa
Módulo de elasticidad $MOE_{0.05}$	14861,72 MPa	23453,63 MPa

\*El  $MOE_{0.05}$  para flexión fue modificado por el coeficiente de contenido de humedad ya que en laboratorio se obtuvo un C.H.=17%

**Paso 4:** Control por esfuerzos admisibles

$$Carga\ axial\ (F) = 3307,28\ kgf = 32444,42\ N$$

$$Momento = 801,23\ kgf - m = 7857382,18\ N - mm$$

$$\sigma_{comp} = \frac{F}{A} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$$A = 23561,90\ mm^2$$

$$\sigma_{comp} = \frac{32444,42\ N}{23561,90\ mm^2}$$

$$\sigma_{comp} = 1,377\ MPa$$

$$1,377\ MPa \leq 29,67\ MPa\ \text{CUMPLE}$$

**Paso 5:** Chequeo de elemento solicitado a compresión axial

$$Le = Lu * k$$

$Le$  = Longitud efectiva del elemento en mm

$Lu$  = Longitud no soportada lateralmente del elemento en mm

$k$  = Coeficiente de longitud efectiva

$$Le = 3000 * 1,0$$

$$L_e = 3000 \text{ mm}$$

Para elementos constituidos por 2 o más culmos

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

$$\text{Inercia (I)} = 162135633,40 \text{ mm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{162135633,40}{23561,90}}$$

$$r = 82,95 \text{ mm}$$

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

$\lambda$  = relación de esbeltez

$r$  = radio de giro de la sección en mm

$$\lambda = \frac{3000}{82,95}$$

$$\lambda = 36,17$$

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{MOE_{0.05}}{\sigma'_{adm-comp}}}$$

$C_k$  = límite entre columnas

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{23453,63}{29,67}}$$

$$C_k = 72,12$$

Según la Tabla 69 se clasifica como una **columna intermedia**

$$\sigma_{comp} = \frac{N_a}{An * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^3\right)} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$\sigma_{comp}$  = Esfuerzo de compresión actuante en MPa

$N_a$  = Fuerza de compresión aplicada en N

$An$  = Área neta del elemento en mm<sup>2</sup>

$\sigma'_{adm-compr}$  = Esfuerzo de compresión admisible modificado en MPa

$$\sigma_{comp} = \frac{32444,42 \text{ N}}{23561,90 * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{36,17}{72,12}\right]^3\right)}$$

$$1,449 \leq 29,67 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo de elementos sometidos a flexo-compresión

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * MOE_{0,05} * I}{le^2}$$

$N_{cr}$  = Carga crítica de Euler en N

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 14861,72 * 162135633,40}{3000^2}$$

$$N_{cr} = 2642437,86 \text{ N}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left(\frac{N_a}{N_{cr}}\right)}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left(\frac{32444,42}{2642437,86}\right)}$$

$$k_m = 1,019$$

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{adm-flex}$$

$$S = \frac{\pi * (D_e^4 - (D_e - 2e)^4)}{32 * D_e} * \#culmos$$

$\sigma_{flex}$  = Esfuerzo de flexión actuante en MPa

$\sigma'_{adm-flex}$  = Esfuerzo de flexión admisible modificado en MPa

$M$  = Momento actuante sobre el elemento en N – mm

$S$  = Módulo de sección en  $mm^3$

$$S = \frac{\pi * (140^4 - (140 - 2 * 15)^4)}{32 * 140} * 4$$

$$S = 666887,19 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{flex} = \frac{7857382,18 \text{ N} - \text{mm}}{666887,19 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{flex} = 11,78 \text{ MPa}$$

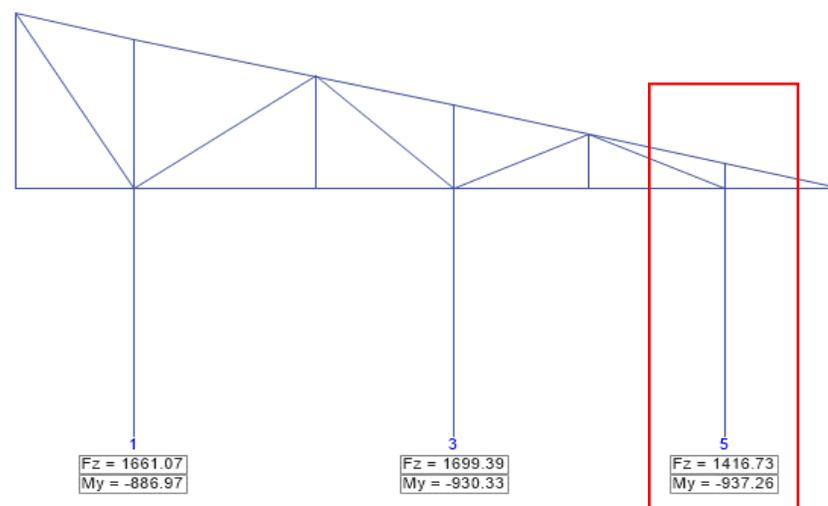
$$11,78 \leq 27,13 \text{ CUMPLE}$$

$$\frac{\sigma_{comp}}{\sigma'_{adm-comp}} + \frac{k_m * \sigma_{flex}}{\sigma'_{adm-flex}} \leq 1.0$$

$$\frac{1,45}{29,67} + \frac{1,019 * 11,78}{27,13} \leq 1.0$$

$$0,49 \leq 1.0 \text{ CUMPLE}$$

### COLUMNA C1-5



**Figura 137.** Resultados de la carga actuante en la columna C1-5

**Paso 3:** Cálculo de los esfuerzos admisibles modificados y módulos de elasticidad de diseño en compresión y flexión (Ver Tabla 77)

**Paso 4:** Control por esfuerzos admisibles

$$\text{Carga axial } (F) = 1416,73 \text{ kgf} = 13893,38 \text{ N}$$

$$\text{Momento} = 937,26 \text{ kgf} - m = 9191381,78 \text{ N} - mm$$

$$\sigma_{comp} = \frac{F}{A} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$$A = 23561,90 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{comp} = \frac{13893,38 \text{ N}}{23561,90 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{comp} = 0,589 \text{ MPa}$$

$$0,589 \text{ MPa} \leq 29,67 \text{ MPa} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 5:** Chequeo de elemento solicitado a compresión axial

$$Le = Lu * k$$

*Le = Longitud efectiva del elemento en mm*

*Lu = Longitud no soportada lateralmente del elemento en mm*

*k = Coeficiente de longitud efectiva (ver Tabla 68)*

$$Le = 3000 * 1,0$$

$$Le = 3000 \text{ mm}$$

Para elementos constituidos por 2 o más culmos

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

$$\text{Inercia } (I) = 162135633,40 \text{ mm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{162135633,40}{23561,90}}$$

$$r = 82,95 \text{ mm}$$

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

$\lambda$  = relación de esbeltez

$r$  = radio de giro de la sección en mm

$$\lambda = \frac{3000}{82,95}$$

$$\lambda = 36,17$$

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{MOE_{0,05}}{\sigma'_{adm-comp}}}$$

$C_k$  = límite entre columnas

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{23453,63}{29,67}}$$

$$C_k = 72,12$$

Según la Tabla 69 se clasifica como una **columna intermedia**

$$\sigma_{comp} = \frac{N_a}{An * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^3\right)} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$\sigma_{comp}$  = Esfuerzo de compresión actuante en MPa

$N_a$  = Fuerza de compresión aplicada en N

$An$  = Área neta del elemento en mm<sup>2</sup>

$\sigma'_{adm-compr}$  = Esfuerzo de compresión admisible modificado en MPa

$$\sigma_{comp} = \frac{13893,38 \text{ N}}{23561,90 * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{36,17}{72,12}\right]^3\right)}$$

$$0,62 \leq 29,67 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo de elementos sometidos a flexo-compresión

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * MOE_{0,05} * I}{le^2}$$

$N_{cr}$  = Carga crítica de Euler en N

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 14861,72 * 162135633,40}{3000^2}$$

$$N_{cr} = 2642437,86 \text{ N}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left( \frac{N_a}{N_{cr}} \right)}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left( \frac{13893,38}{2642437,86} \right)}$$

$$k_m = 1,08$$

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{adm-flex}$$

$$S = \frac{\pi * (D_e^4 - (D_e - 2e)^4)}{32 * D_e} * \#culmos$$

$\sigma_{flex}$  = Esfuerzo de flexión actuante en MPa

$\sigma'_{adm-flex}$  = Esfuerzo de flexión admisible modificado en MPa

$M$  = Momento actuante sobre el elemento en N – mm

$S$  = Módulo de sección en  $mm^3$

$$S = \frac{\pi * (140^4 - (140 - 2 * 15)^4)}{32 * 140} * 4$$

$$S = 666887,19 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{flex} = \frac{9191381,78 \text{ N} - \text{mm}}{666887,19 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{flex} = 13,78 \text{ MPa}$$

$$13,78 \leq 27,13 \text{ CUMPLE}$$

$$\frac{\sigma_{comp}}{\sigma'_{adm-comp}} + \frac{k_m * \sigma_{flex}}{\sigma'_{adm-flex}} \leq 1.0$$

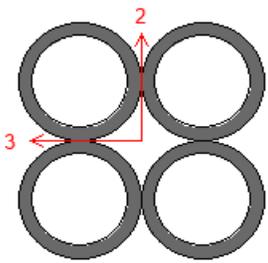
$$\frac{0,62}{29,67} + \frac{1,08 * 13,78}{27,13} \leq 1.0$$

$$0,57 \leq 1.0 \text{ CUMPLE}$$

### 6.5.5.6. Resumen de columnas

**Tabla 78**

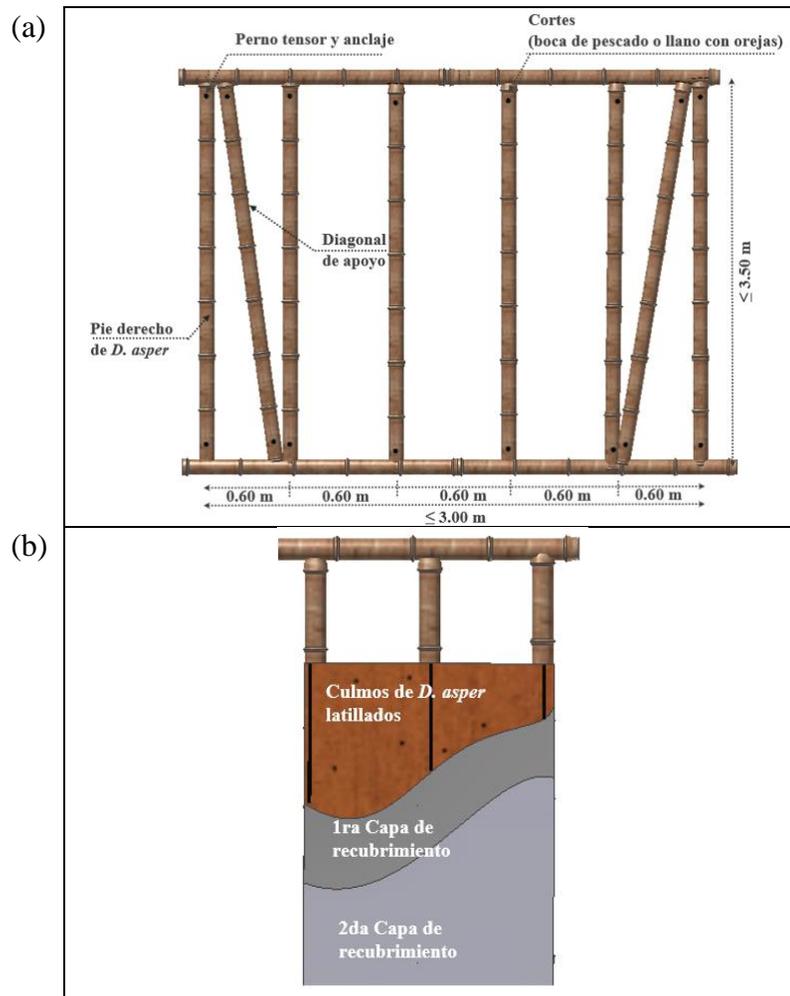
*Resumen del tipo de columna y su configuración para la vivienda N°1*

<b>CONFIGURACIÓN PARA TODAS LAS COLUMNAS DE LA ESTRUCTURA – VIVIENDA N°1</b>  <b>Total: 18</b>	<b>N° de Culmos:</b>	4	
	<b>Diámetro externo:</b>	140 mm	
	<b>Espesor:</b>	15 mm	
	<b>Área:</b>	23561,90 mm <sup>2</sup>	
	<b>Longitud libre:</b>	3 m	

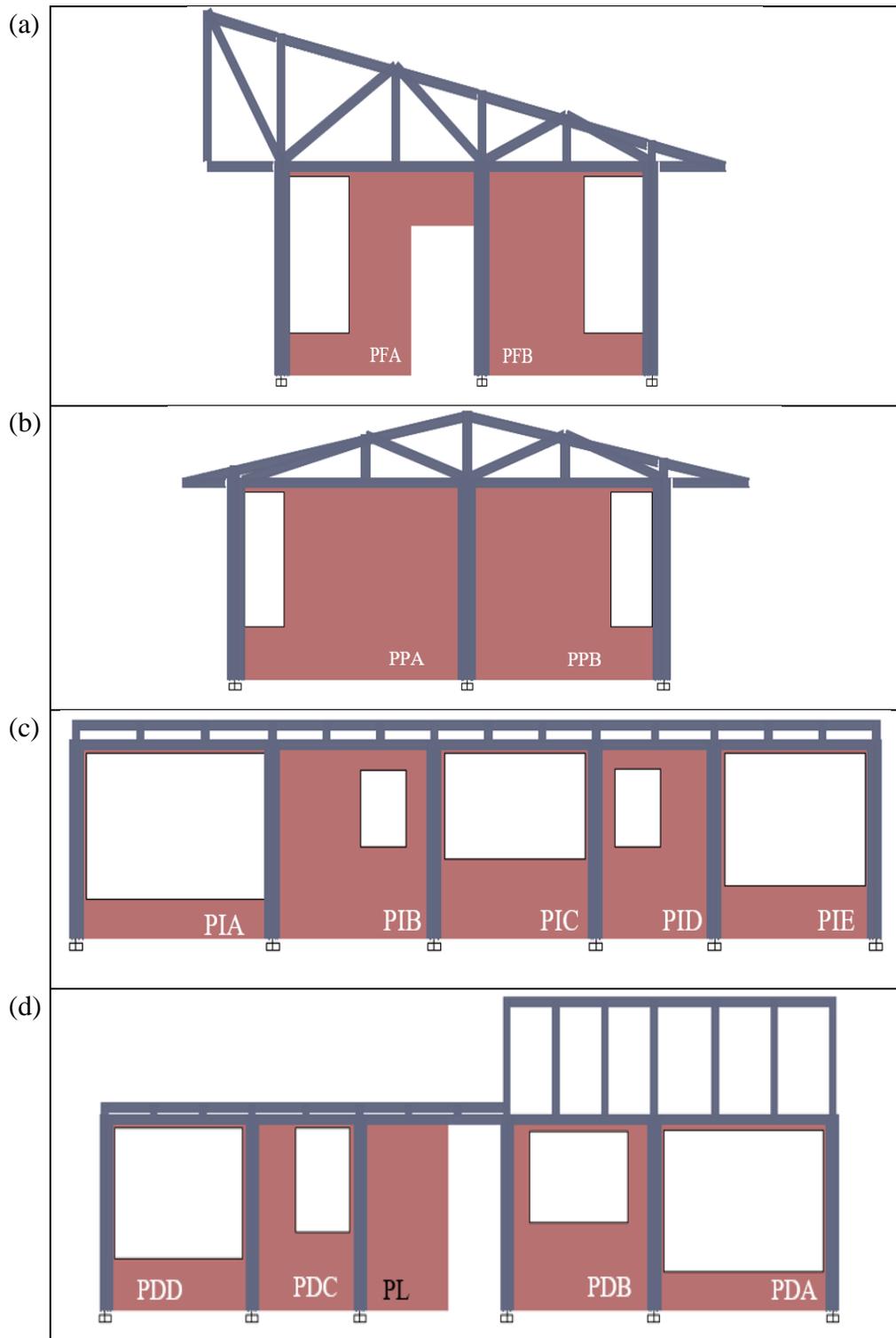
### 6.5.6. Diseño de entramados

La mampostería de la vivienda propuesta (paredes interiores y exteriores) se realizará a base de entramados de bambú, seguido por una capa de esterilla del mismo material para luego colocar una capa de recubrimiento de mortero y enlucido logrando una tonalidad blanca de acabado liso (ver Figura 138). Por lo tanto, los elementos que participarán estructuralmente son los entramados, los cuales serán diseñados de la misma manera que las columnas, considerando esta vez que la configuración de estructura es de un solo culmo ya que las cargas gravitatorias que soportarán estos elementos son relativamente bajas a razón de que las columnas y armaduras de celosías absorben previamente el peso de la cubierta; sin embargo, por ser elementos de fachada y expuestos a cargas horizontales (sismo, viento) se debe analizar

su comportamiento flexo-compresivo. En la Figura 139 se puede observar los sectores de la vivienda en que se planifica ubicar los elementos de entramados.



**Figura 138.** Mampostería para la vivienda N°1 (a) estructura con entramados de bambú (b) recubrimiento de mortero y enlucido para acabado liso



**Figura 139.** Fachada de la vivienda donde se ubicarán los entramados (a) vista frontal, (b) vista posterior, (c) vista lateral derecha, y (c) vista lateral izquierda

### 6.5.6.1. Análisis de cargas

Para este análisis se procedió a recopilar la información de las cargas provocadas por el peso de cubiertas y el peso propio de las celosías para obtener la carga gravitatoria que absorben los entramados de diseño (ver Tabla 79). Consecuentemente se realizó un listado de todas las paredes de la vivienda (ver Figura 139) a través de la Tabla 80 con el objetivo de calcular el peso específico a cada tipo de pared.

**Tabla 79**

*Carga proveniente de cubiertas y armadura de celosías*

Tipo cubierta	Peso cubierta	PP. Celosías	P. Total a soleras perimetrales
-	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
1	225,75	14,077	239,827
2	225,75	10,547	236,297

**Tabla 80**

*Análisis de cargas de los entramados de cada pared de la vivienda*

Tipo-pared	Entramado	Área m <sup>2</sup>	Solera superior parcial m	Cubierta	Peso lineal kg/m	Diseño
PFA	Confinado	6,8	3,27	1	784,23	PA1
PFB	Confinado	6,5	2,72	1	652,33	PA2
PPA	Confinado	9,45	2,72	2	642,73	PA2
PPB	Confinado	7,75	3,27	2	772,69	PA1
PDA	Inferior	3,86	0	1	0,00	
PDB	Medio	6,2	2,72	1	652,33	PA2
PDC	Confinado	4,84	1,92	2	453,69	PA3
PCD	Inferior	3,8	0	2	0,00	
PIA	Inferior	3,69	0	1	0,00	
PIB	Confinado	8	2,86	1	685,90	PA2
PIC	Medio	4,84	2,72	2	642,73	PA2
PID	Confinado	5,6	1,92	2	453,69	PA3
PIE	Inferior	3,8	0	2	0,00	

En base a la Tabla 80, se clasificó por cargas máximas en 3 tipos de entramados (PA1 = 784,23 kg/m; PA2 = 685,90 kg/m; PA3 = 453,69 kg/m); para esta sección, se realizará el diseño completo de PA1 por contener la máxima carga.

**Carga del viento en entramados:** Los datos que refieren al cálculo de la carga de viento se los puede revisar en la sección 6.5.2 del presente documento, donde se especifican todos los parámetros de diseño desarrollados. En base a la velocidad de diseño calculada y la Tabla 61 se procede a aplicar la Ecuación (24)

$$P = \frac{1}{2} * \rho * Vb^2 * C_e * C_f; \text{ Para 3 m de altura: factor en velocidad de diseño 0.99}$$

$$P = \frac{1}{2} * 1,25 * (0,99 * 17,91)^2 * 1,30 \text{ (Tabla 59)} * 0,8 \text{ (Tabla 60)}$$

$$P = 200,32 \frac{N}{m^2} = 20,42 \frac{kg}{m^2}$$

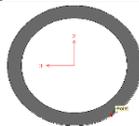
### 6.5.6.2. Control de diseño

**Paso 1:** Se asume la estructura de entramado de 1 culmo de bambú (ver Tabla 81)

**Tabla 81**

*Propiedades geométricas de un culmo de bambú*

<b>Propiedades geométricas</b>	
Área (mm <sup>2</sup> )	5890,49
Centroide Xc (mm)	0,00
Centroide Yc (mm)	0,00
Inercia Ixx (mm <sup>4</sup> )	11670525,80
Inercia Iyy (mm <sup>4</sup> )	11670525,80
Módulo de sección elástico Sxx (mm <sup>3</sup> )	166721,80
Módulo de sección elástico Syy (mm <sup>3</sup> )	166721,80
Módulo de sección plástico Zxx (mm <sup>3</sup> )	233235,50
Módulo de sección plástico Zyy (mm <sup>3</sup> )	233240,60



**Paso 2:** Cálculo de los esfuerzos admisibles modificados y esfuerzos admisibles de diseño para los ensayos de compresión y flexión (Ver Tabla 82)

**Tabla 82**

*Esfuerzos admisibles y los factores de modificación para entramados*

Esfuerzos admisibles	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$
		34,58 MPa
$C_D$	0,90	0,90
$C_m$	0,79	1,00
$C_t$	1,00	1,00
$C_F$	1,10	1,10
$C_L$	-	-
$C_r$	-	-
$C_p$	-	0,803
$C_c$	1,00	1,00
<b>Esfuerzos admisibles modificados</b>	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$
	27,13 MPa	25,22 MPa
<b>Módulo de elasticidad <math>MOE_{0.05}</math></b>	14861,72 MPa	23453,63 MPa

\*El  $MOE_{0.05}$  para flexión fue modificado por el coeficiente de contenido de humedad ya que su C.H de laboratorio fue 17%

**Paso 3:** Condiciones de diseño

*Condición de apoyo: articulado – articulado* (Ver Figura 140)

$$k = 1$$

$$De = 140 \text{ mm}$$

$$e = 15 \text{ mm}$$

$$le - \text{pie derecho } lep = 2,72 \text{ m}$$

La forma de pandeo se indica en línea de puntos	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de proyecto para condiciones reales	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Condiciones de vínculo	<ul style="list-style-type: none"> <li> Rotación y Traslación impedida</li> <li> Rotación libre y Traslación impedida</li> <li> Rotación impedida y Traslación libre</li> <li> Rotación libre y Traslación libre</li> </ul>					

**Figura 140.** Condición de apoyo (k) para los elementos estructurales

Fuente: Bonilla Jiménez et al. (2017)

**Paso 4:** Cargas y esfuerzos máximos

**Carga axial**

$$N_{axial} = W(PA1) * \text{espaciamiento}$$

$$N_{axial} = 784,23 * 0,60$$

$$N_{axial} = 470,54 \text{ kgf}$$

**Carga horizontal**

$$W_h = P * \text{espaciamiento}$$

$$N_{axial} = 20,42 * 0,60$$

$$N_{axial} = 12,25 \text{ kgf}$$

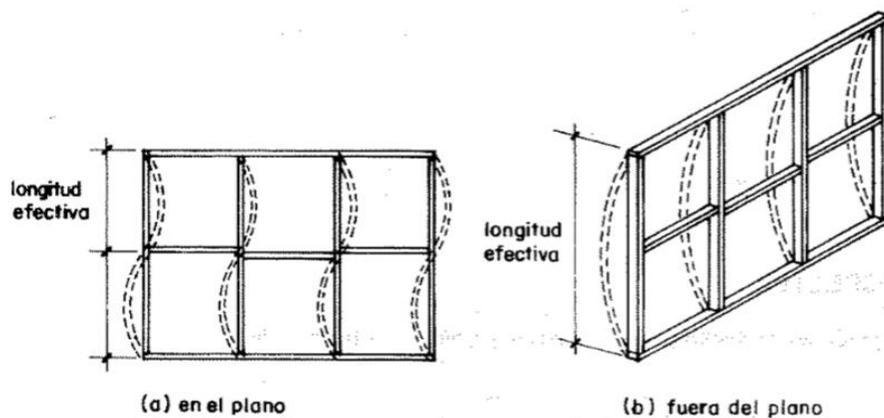
**Momento máximo**

$$M_{max} = \frac{W_h * l_{ep}^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{20,42 * 2,72^2}{8}$$

$$M_{max} = 11,33 \text{ kgf} - m$$

**Paso 5:** Esbeltez en el plano y fuera del plano (ver Figura 141). Debido a ser un elemento circular  $D_e$  será igual en sentido seccional.



**Figura 141.** Esbeltez de entramados (a) en el plano y (b) fuera del plano  
Fuente: JUNAC (1984)

$$\lambda_y = \frac{k * l_e}{2 * D_e}$$

$\lambda_y =$  relación de esbeltez en el plano de entramado

$$\lambda_y = \frac{1 * 2720}{2 * 140}$$

$$\lambda_y = 9,71$$

$$\lambda_x = \frac{k * l_e}{D_e}$$

$\lambda_x =$  relación de esbeltez fuera del plano de entramado

$$\lambda_x = \frac{1 * 2720}{140}$$

$$\lambda_x = 19,43$$

$$\therefore \lambda = 19,43$$

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{MOE_{0.05}}{\sigma'_{adm-comp}}}$$

$C_k =$  límite entre columnas

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{23453,63}{25,22}}$$

$$C_k = 78,22$$

$$19,43 < 30$$

Según la Tabla 69 se clasifica como una **columna corta**

**Paso 6:** Chequeo de elemento sometido a compresión axial

$$\sigma_{comp} = \frac{N_{axial}}{A_n} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$\sigma_{comp} =$  Esfuerzo de compresión actuante en MPa

$N_a =$  Fuerza de compresión aplicada en N

$A_n =$  Área neta del elemento en mm<sup>2</sup>

$\sigma'_{adm-comp} =$  Esfuerzo de compresión admisible modificado en MPa

$$\sigma_{comp} = \frac{470,54 \text{ N}}{5890,49}$$

$$\sigma_{comp} = 0,08 \text{ MPa}$$

$$0,08 \leq 25,22 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 7:** Chequeo de elementos sometidos a flexo-compresión

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * MOE_{0.05} * I}{le^2}$$

$N_{cr}$  = Carga crítica de Euler en N

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 14861,72 * 11670525,80}{2720^2}$$

$$N_{cr} = 231377,67 \text{ N}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left( \frac{N_{axial}}{N_{cr}} \right)}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left( \frac{470,54}{231377,67} \right)}$$

$$k_m = 1,003$$

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{adm-flex}$$

$$S = \frac{\pi * (D_e^4 - (D_e - 2e)^4)}{32 * D_e}$$

$\sigma_{flex}$  = Esfuerzo de flexión actuante en MPa

$\sigma'_{adm-flex}$  = Esfuerzo de flexión admisible en MPa

$M$  = Momento actuante sobre el elemento en N – mm

$S$  = Módulo de sección en  $mm^3$

$$S = \frac{\pi * (140^4 - (140 - 2 * 15)^4)}{32 * 140}$$

$$S = 166721,80 \text{ mm}^3$$

$$M = 11,33 \text{ kgf} - m = 111115,86 \text{ N} - mm$$

$$\sigma_{flex} = \frac{111115,86 \text{ N} - \text{mm}}{166721,80 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{flex} = 0,667 \text{ MPa}$$

$$0,667 \leq 27,13 \text{ CUMPLE}$$

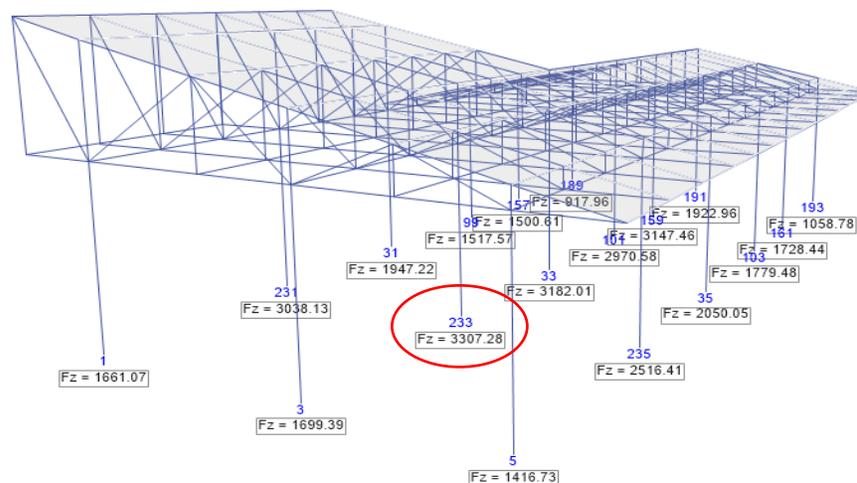
$$\frac{\sigma_{comp}}{\sigma'_{adm-comp}} + \frac{k_m * \sigma_{flex}}{\sigma'_{adm-flex}} \leq 1.0$$

$$\frac{0,080374}{25,22} + \frac{1,003 * 0,667}{27,13} \leq 1.0$$

$$0,028 \leq 1.0 \text{ CUMPLE}$$

### 6.5.7. Diseño de cimentaciones

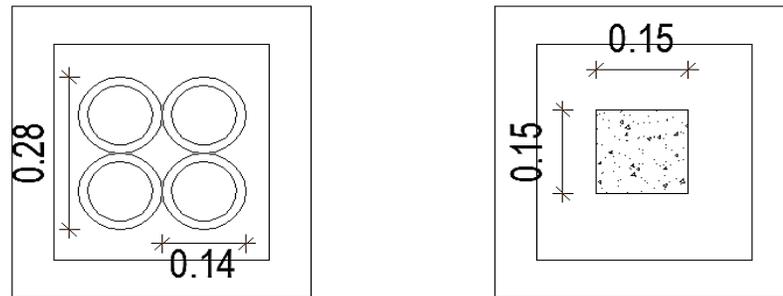
Para iniciar el cálculo de cimentaciones se procede a tomar la carga axial de diseño más crítica que se haya generado en el análisis de todos los tipos de columnas (ver Figura 142); para el caso de esta vivienda solamente existió un tipo de columna y con la carga máxima del total se diseñará la cimentación.



**Figura 142.** Cargas axiales de todas las columnas de la vivienda N°1-prototipo social

Cabe mencionar que la tipología de cimentación de la presente vivienda contará únicamente con plintos aislados, los mismos que serán unidos hacia las columnas de bambú

mediante un sobrecimiento que permitan el anclaje perfecto con la estructura de fundación (ver Figura 143).



**Figura 143.** Plintos aislados para la cimentación (a) modelo real con columnas de bambú y (b) modelo equivalente con columnas de hormigón

#### 6.5.7.1. Análisis de cargas y predimensionamiento

La columna que más aporte de carga obtuvo fue la C1-4 (ubicación en planta en la Figura 131) con 3307,28 kgf distribuido a lo largo de la configuración del elemento estructural. A este aporte es necesario sumarle el peso propio de la columna de 4 culmos.

- Carga axial de cubierta y armadura:  **$P_a = 3307,28 \text{ kgf}$**
- Peso propio de columnas (4 culmos):  $P_{pc} = 23561,90 \text{ mm}^2 * (1/1000^2) * 3 \text{ m} * 686,04 \text{ kg/m}^3 = 48,489 \text{ kgf}$   
**Peso total:  $P = 3307,28 + 48,49 = 3355,77 \text{ kgf}$**
- Hormigón:  **$f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$**
- Acero:  **$f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$**
- Esfuerzo admisible del suelo de Quevedo:  **$\sigma_s = 7 \text{ T/m}^2$**  (Valor referencial hasta obtener un estudio de suelos completo de la zona a implementar)

- Altura de fundación:  $h_{\text{plinto}} = 1,00 \text{ m}$

### 6.5.7.2. Control de diseño

*Paso 1:* Verificación del área de fundación.

$$A^F = \frac{P + \%P [Tn]}{\sigma s}$$

$$A^F = \text{Área de fundación en } m^2$$

$$P = \text{Peso total que llega al cimiento en Tn}$$

$$\% P = \text{Porcentaje de carga de seguridad (10\%)}$$

$$A^F = \frac{3,356 * 1,10}{7}$$

$$A^F = 0,527 m^2$$

$$A = B = \sqrt{A^F}$$

$$A = \text{Lado 1 del plinto aislado en (m)}$$

$$B = \text{Lado 2 del plinto aislado en (m)}$$

$$A = B = \sqrt{0,527}$$

$$A = B = 0,73 \text{ m}$$

$$A^F \text{ Adoptado} = 1,00 * 1,00 = 1,00 m^2$$

*Paso 2:* Verificación de presión del suelo (ver Figura 144).

$$PNS = \frac{P}{A^F \text{ Adop}}$$

$$PNS = \text{Presión neta del suelo en (Tn/m}^2\text{)}$$

$$PNS = \frac{3,356}{1,00}$$

$$PNS = 3,356 \text{ Tn/m}^2$$

$$PNS < \sigma s$$

$$3,356 \frac{T}{m^2} < 10 \frac{T}{m^2} \text{ CUMPLE}$$

$$f_{may} = \frac{1,2D + 1,6L}{D + L}$$

$f_{may}$  = factor de mayoración para la presión que ejerce la estructura

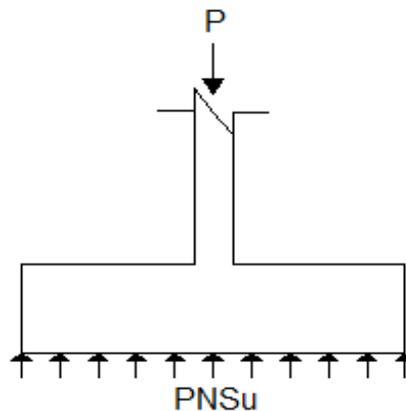
$$f_{may} = 1,28 \text{ Por carga de servicio}$$

$$PNS_u = PNS * f_{may}$$

$PNS_u$  = Presión neta del suelo última

$$PNS_u = 3,356 * 1,28$$

$$PNS_u = 4,30 \text{ Tn/m}^2$$



**Figura 144.** Esquema de la fuerza actuante que se ejerce sobre el plinto y la presión del suelo en sentido contrario

**Paso 3:** Chequeo del corte unidireccional.

Para cumplir con el cortante unidireccional, el cortante último deberá ser menor o en un caso crítico hasta igual al cortante permisible:

$$v_u \leq v_p$$

$v_u$  = cortante último unidireccional en  $Tn/m^2$

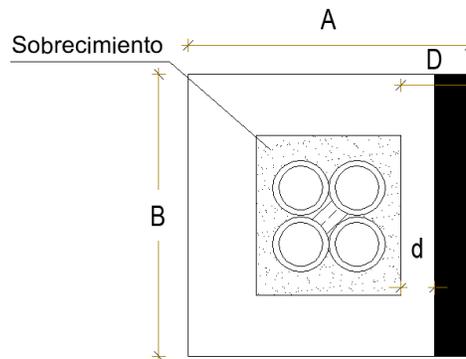
$v_p$  = cortante permisible en  $Tn/m^2$

$$v_u = \frac{Vu}{d * b * \phi} \quad y \quad v_p = 0.53 * \sqrt{f'c}$$

$d$  = altura del plinto sin el recubrimiento

$b$  = Lado de análisis 1 o 2 del plinto

El cortante unidireccional se chequea a una distancia  $d$  de la cara de la columna, como se observa en la Figura 145. Para poder continuar con el diseño del plinto se lo puede realizar mediante iteraciones, imponiendo una altura  $h$ ; o caso contrario, se puede igualar  $v_u = v_p$ , teniendo el caso más crítico y obtener a través de ecuaciones la altura ( $h$ ), para luego adoptarla con criterio técnico.



**Figura 145.** Chequeo del corte unidireccional en plintos aislados

$$h_{ASUMIDO} = 25,0 \text{ cm}$$

$$\text{recubrimiento} = 7,5 \text{ cm}$$

$$d = 0,25\text{m} - 0,075\text{m} = 0,175\text{m}$$

$$d_{ASUMIDO} = 17,5 \text{ cm}$$

$$A = B = 1,00 \text{ m}$$

$$D = \frac{B - \text{cara del sobrecimiento}}{2}$$

$$D = \frac{1,00 \text{ m} - 0,40 \text{ m}}{2}$$

$$D = 0,30 \text{ m}$$

$$L_v \text{ longitud de volado} = D - d$$

$$L_v = 0,30 - 0,175$$

$$L_v = 0,125 \text{ m}$$

$$V_u = P N S_u * (L_v) * B$$

$$V_u = 4,30 * (0,125) * 1,00$$

$$V_u = 0,54 \text{ Tn}$$

$$v_u = \frac{V_u}{d * b * \phi}$$

$$v_u = \frac{0,54}{0,175 * 1,00 * 0,75}$$

$$v_u = 4,09 \text{ Tn/m}^2$$

$$v_p = 0.53 * \sqrt{f'c}$$

$$v_p = 0.53 * \sqrt{210} * 9,81$$

$$v_p = 75,59 \text{ Tn/m}^2$$

$$4,09 \text{ Tn/m}^2 < 75,59 \text{ Tn/m}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

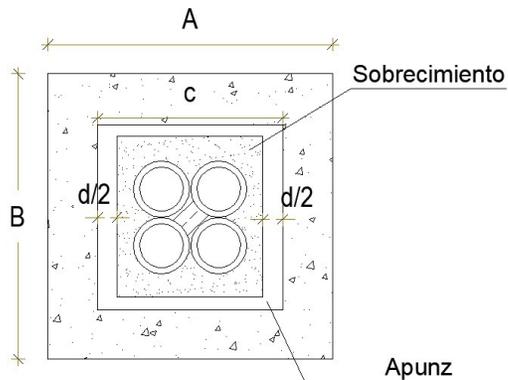
**Paso 4:** Chequeo del corte bidireccional.

Para cumplir con el cortante bidireccional, el cortante último debe ser menor o en su defecto igual al cortante permisible:

$$v_u \leq v_p$$

$$v_u = \frac{V_u}{d * b_o * \phi} \quad y \quad v_p = 1,06 * \sqrt{f'c}$$

El cortante bidireccional se chequea a una distancia  $d/2$  de la cara de la columna en todos los sentidos, tal como se muestra en la Figura 146:



**Figura 146.** Chequeo del corte bidireccional en pilotes aislados

Para calcular el  $V_u$ :

$$V_u = P N S_u * (A_T - A_{PUN})$$

$A_T$  = Área total de fundación

$$A_{PUN} = a_{PUN} * a_{PUN}$$

$A_{PUN}$  = Área de punzonamiento

$$a_{PUN} = \text{sobrecimiento} + d$$

$a_{PUN}$  = Ancho de punzonamiento

$$a_{PUN} = 0,40 + 0,175 \text{ m}$$

$$a_{PUN} = 0,575 \text{ m}$$

$$A_{PUN} = a_{PUN} * a_{PUN}$$

$$A_{PUN} = 0,575 * 0,575 \text{ m}^2$$

$$A_{PUN} = 0,33 \text{ m}^2$$

$$\therefore V_u = P N S_u * (A_T - A_{PUN})$$

$$\therefore V_u = 4,30 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^2} (1,00 - 0,33)$$

$$\therefore V_u = 2,88 \text{ Tn}$$

Cálculo del  $b_o$ , el cual es el perímetro de punzonamiento:

$$b_o = (2 * a_{PUN}) + (2 * a_{PUN})$$

$$b_o = (2 * 0,58) + (2 * 0,58) = 2,30 \text{ m}$$

Reemplazar datos en la ecuación inicial para el caso más crítico:

$$v_u = \frac{Vu}{d * b_o * \phi}$$

$$v_u = \frac{2,88 \text{ Tn}}{0,175 * 2,30 * 0,75} = 9,52 \text{ Tn/m}^2$$

$$v_p = 1,06 * \sqrt{f'c}$$

$$v_p = 1,06 * \sqrt{210} = 15,36 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_p = 151,18 \text{ Tn/m}^2$$

$$9,29 \text{ Tn/m}^2 \leq 151,18 \text{ Tn/m}^2 \text{ CUMPLE}$$

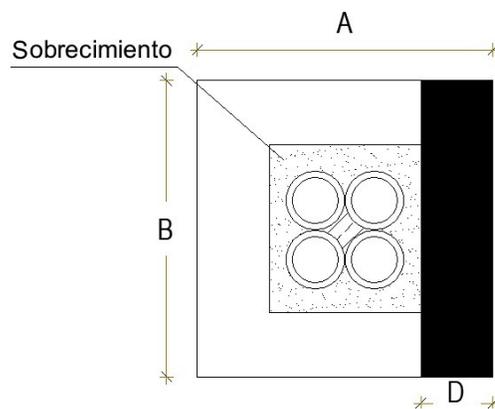
Después de haber chequeado los cortantes unidireccional y bidireccional, se puede resumir que el plinto tiene la siguiente altura definitiva:

$$h_{DEFINITIVA} = 25 \text{ cm}$$

$$d_{DEFINITIVA} = 17,5 \text{ cm}$$

**Paso 5:** Diseño a flexión

Se procede a calcular el momento flector, el mismo que se lo analiza entre la cara de la columna y la mitad del cimientto (ver Figura 147)



**Figura 147.** Sector de análisis del momento flector

$$Mu = PNs_u * \frac{Lv^2}{2} * B$$

$$Lv \text{ (longitud de volado)} = \frac{B - \text{cara sobrecimiento}}{2}$$

$$Lv = \frac{1,00 - 0,40}{2}$$

$$Lv = 0,30 \text{ m}$$

$$\therefore Mu = 4,30 * \frac{0,30^2}{2} * 1.00 \text{ Tn - m}$$

$$\therefore Mu = 0,1935 \text{ Tn - m}$$

A partir del momento flector calculado, el siguiente paso es calcular la cuantía y el área de acero necesaria para el plinto.

$$\rho = 0,85 \left( \frac{f'c}{fy} \right) \left( 1 - \left( 1 - \frac{2 * Mu}{\phi * 0,85 * f'c * b * d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$\rho = 0,85 \left( \frac{210}{4200} \right) \left( 1 - \left( 1 - \frac{2 * 0,1935 * 10^5}{0,90 * 0,85 * 210 * 100 * 17,5^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$\rho = 0,00017 < \rho_{min} = \frac{14}{fy} = 0,0033$$

Se toma la cuantía mínima para el acero, por la razón que la cuantía calculada resultó menor. Ahora se procede a calcular el área de acero que se colocará en el plinto.

$$As = \rho * b * d$$

$$As = 0,0033 * 100 * 17,5$$

$$As = 5,83 \text{ cm}^2$$

El área de acero obtenida se puede distribuir de la siguiente manera:

$$\text{Espaciamiento} = 15 \text{ cm}$$

$$\text{Recubrimiento} = 7,5 \text{ cm}$$

$$\text{número de varillas} = \frac{(1,00 - 0,15)}{0,15} + 1$$

$$\text{número de varillas} = 6,67 \approx 7$$

$$\phi \text{ varilla} = \frac{As}{\text{número de varillas}}$$

$$\phi \text{ varilla} = \frac{5,83}{7} = 0,83$$

$$\phi \text{ varilla (mínima)} = \phi 12\text{mm} (A_{s_{unit}} = 1,13)$$

Entonces el armado del plinto aislado será:

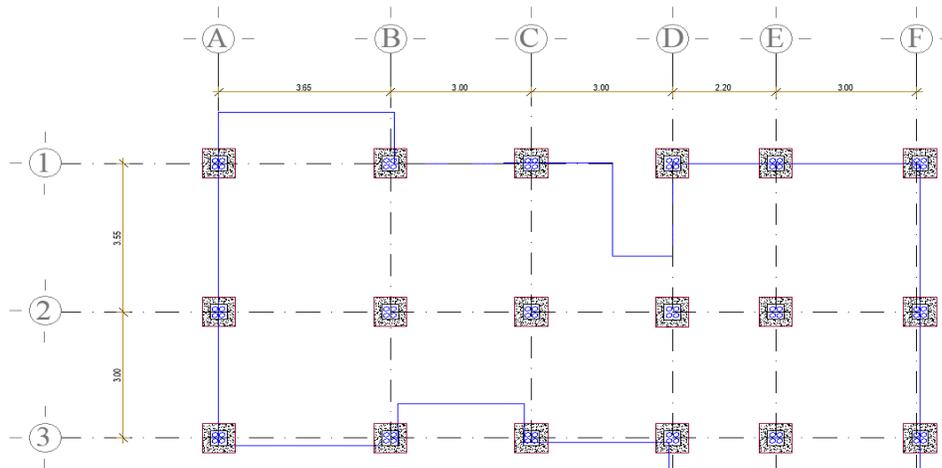
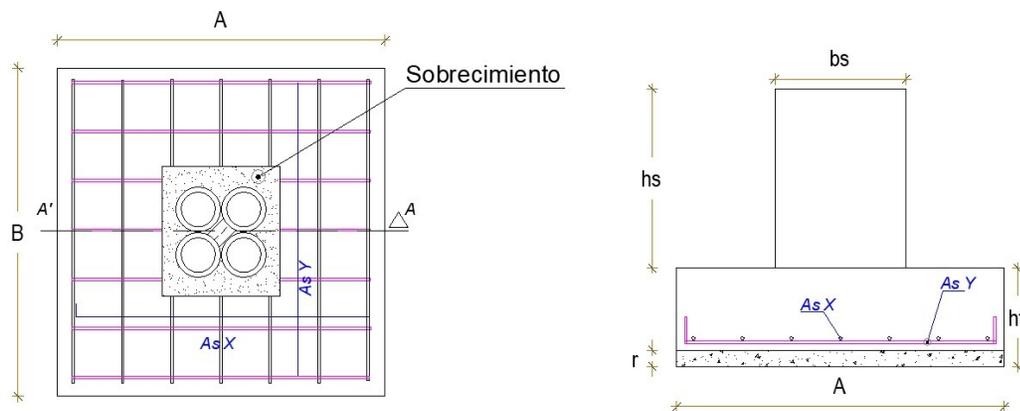
$$7\phi 12\text{mm} (1\phi 12\text{mm} @ 15\text{cm}) \quad A_{s_{ADOPTADO}} = 7,91 \text{ cm}^2$$

### 6.5.7.3. Resumen de cimentación

**Tabla 83**

*Resumen del tipo de cimiento y su armado para la vivienda N°1*

PLINTO	A (m)	B (m)	hf (m)	r (m)	Armadura sentido X-Y
Tipo I	1,00	1,00	0,25	0,075	1φ12mm @15cm
SOBRECIMIENTO	bsA (m)	bsB (m)	hs (m)		
Tipo I	0,40	0,40	1,25		



### 6.5.8. Diseño del sobrecimiento (pedestal)

El sobrecimiento será diseñado como una columna corta empotrada en su base y libre en el extremo (ver Figura 148).

La forma de pandeo se indica en línea de puntos	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de proyecto para condiciones reales	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Condiciones de vínculo						

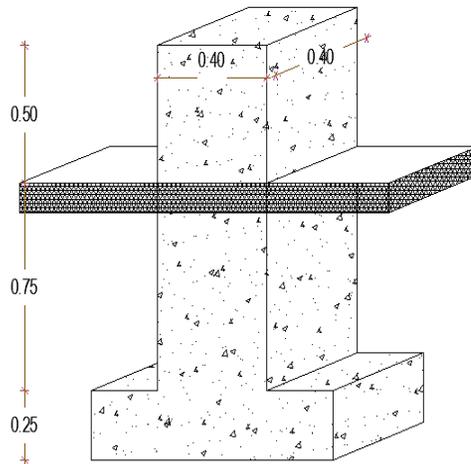
Figura 148. Condición de apoyo (k) para el sobrecimiento

#### 6.5.8.1. Control de diseño sobrecimiento

**Paso 1:** Control de esbeltez a través del condicionamiento de la Tabla 84, para lo cual será necesario analizar la geometría del sobrecimiento (ver Figura 149).

**Tabla 84.**  
Condiciones de elementos sin esbeltez

Evaluación	Condición
$\frac{kLef}{r} \leq 22$	Columnas no arriostradas contra desplazamientos laterales. (ACI318-RSUS; 2014) sección 6.2.
$\frac{klef}{r} \leq 34 + 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)$ y $\frac{klef}{r} \leq 40$	Columnas arriostradas contra desplazamientos laterales; donde $M_1/M_2$ es negativo si la columna está en curvatura simple y positivo si está en doble curvatura. (ACI318-RSUS; 2014) sección 6.2.



**Figura 149.** Geometría del sobrecimiento de la vivienda N°1

Se determina el radio de giro del elemento:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = \frac{h}{\sqrt{12}} =$$

$$r = \frac{0,40}{\sqrt{12}} = 0,11547 \text{ m}$$

Se evalúa el modelo

$$L_{ef} = 0,75 + 0,50 \text{ m} = 1,25 \text{ m}$$

$$k = 2$$

$$\therefore \frac{k * L_{ef}}{r} \leq 22$$

$$\therefore \frac{2 * 1,25}{0,11547} \leq 22$$

$$\therefore 21,65 \leq 22 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 2:** Determinación de la cuantía longitudinal.

La norma **ACI 318-14 sección 18.7.4.1** indica que la cuantía longitudinal debe ser al menos 0.01 y no exceder 0.06. Sin embargo, en el caso de que se realicen traslapos de todas las varillas, estos límites quedan de la siguiente manera:

$$0,01 \leq \rho \leq 0,03$$

$$\rho = \rho_{min} = 0,01 \text{ (para diseño de sobrecimiento)}$$

$$A_g = 40 \text{ cm} * 40 \text{ cm} = 1600 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{A_{sl}}{A_g}$$

$$\rightarrow \rho * A_g = A_{sl}$$

$$0,01 * 1600 = 16 \text{ cm}^2$$

$$A_{sl} = 16 \text{ cm}^2 \rightarrow 8\emptyset 16 \text{ mm} = 16,08 \text{ cm}^2$$

**Paso 3:** Espaciamiento

Según el **ACI 18.7.5.3** la separación del refuerzo transversal  $s_o$  no debe exceder el menor valor entre

$$s_o \leq \begin{cases} a) \frac{1}{4} \text{ dimensión menor de columna (b)} \\ b) 6 * \emptyset (\text{menor varilla de refuerzo longitudinal}) \\ c) s_o = 100 + \left( \frac{350 - h_x}{3} \right) ; 100 \leq s_o \leq 150 \text{ mm} ; h_x \end{cases}$$

$b$  = Es la dimensión menor de la columna,

$\emptyset$  = Es el diámetro de la menor barra de refuerzo longitudinal

$s_o$  = No debe ser mayor a 150 mm ni menor a 100 mm

$h_x$  = Es el espaciamiento máximo, medido centro a centro en mm, entre barras longitudinales soportadas por estribos o ganchos.

$$S_o \leq \begin{cases} a) \frac{1}{4} * 40 = 10 \text{ cm} \\ b) 6 * \emptyset 16 = 9.6 \text{ cm} \\ c) 100 \leq s_o \leq 150 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow \text{Asumo } S_o = 10 \text{ cm}$$

$\therefore$  Armadura longitudinal **8  $\emptyset$  16 mm**

**Paso 4:** Diseño de estribos por confinamiento (Ash):

El área total del refuerzo transversal colocado dentro del espaciamiento  $s$  (medido en  $\text{cm}^2$ ) no puede ser menor que ninguna de las siguientes ecuaciones ACI 18.7.5.4:

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} \geq \left[ 0,3 \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} ; 0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}} \right]$$

$b_c =$  : Es la dimensión del núcleo, perpendicular a las ramas del estribo cerrado de confinamiento que conforman  $A_{sh}$

$$b_c = b - \text{recubrimiento} - \emptyset \text{ transversal} = 40 - 3 - 3 - 1 = \mathbf{33 \text{ cm}}$$

$A_{ch}$  = Es el área del núcleo de hormigón

$f_{yt}$  = Es el esfuerzo de fluencia del acero de los estribos. Finalmente, el núcleo de hormigón es el área delimitada por los bordes externos del estribo.

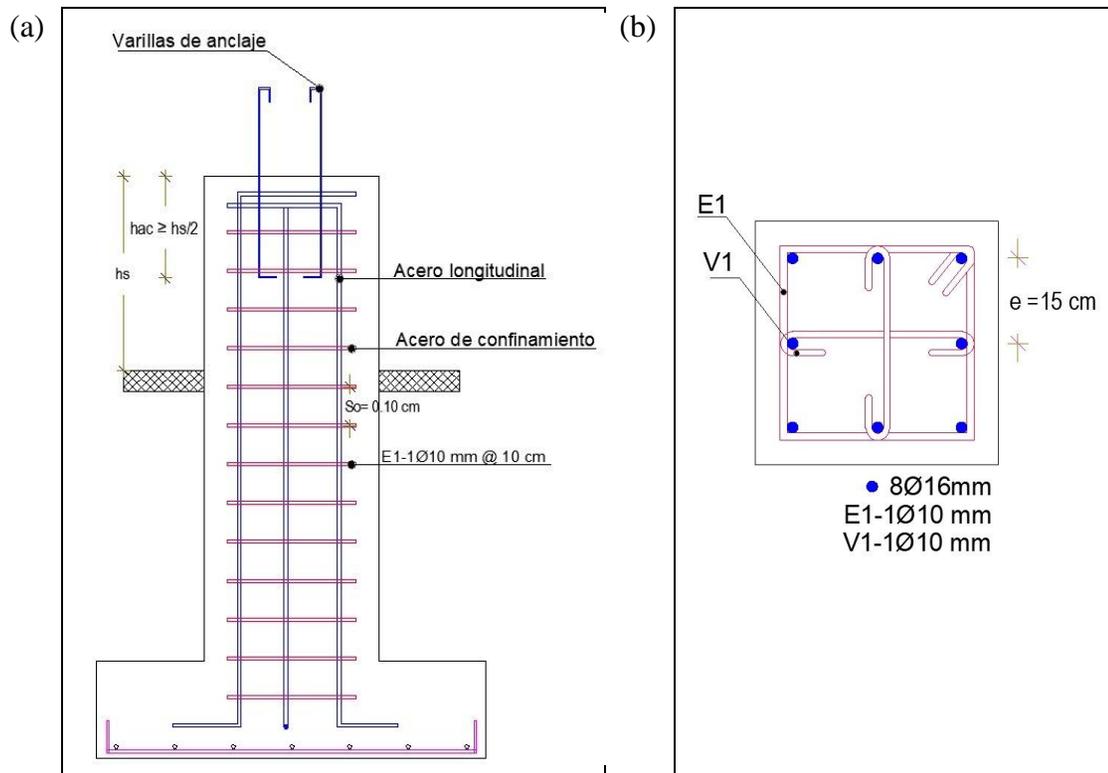
$A_{sh}$  = Debe calcularse para las dos direcciones definidas por los lados de la columna.

$$A_{sh1} = 0,3 \frac{10 * 33 * 210}{4200} \left[ \left( \frac{40 * 40}{33 * 33} \right) - 1 \right] ; A_{sh2} = \frac{0,09 * 10 * 33 * 210}{4200}$$

$$A_{sh} \geq A_{sh1}; A_{sh2}$$

$$A_{sh} = 2,32 \rightarrow \mathbf{3 \emptyset 10 \text{ mm}}$$
 En ambos sentidos x; y

### 6.5.8.2. Resumen de sobrecimiento



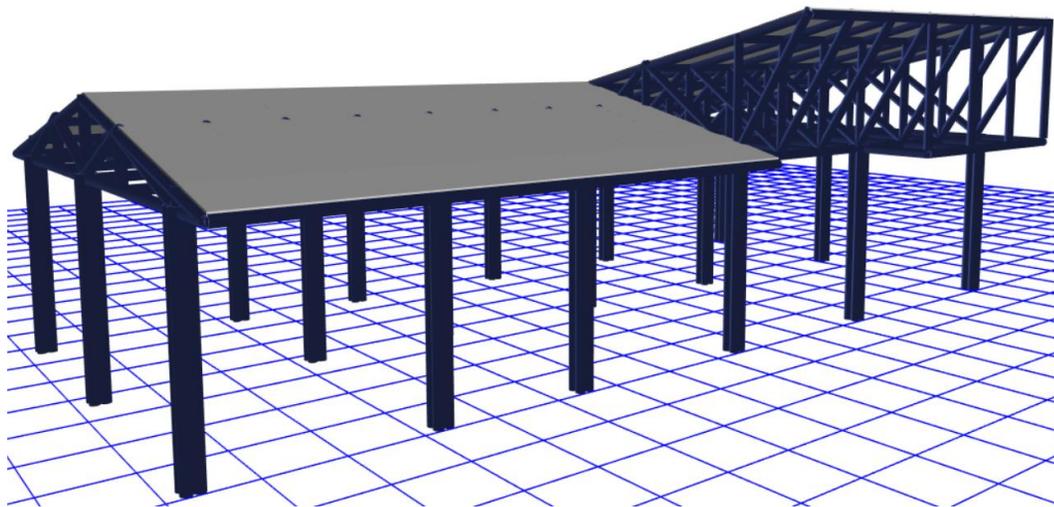
**Figura 150.** Armado del sobrecimiento (a) corte longitudinal y (b) corte transversal.

### 6.5.9. Análisis estructural completo a través del modelamiento en Etabs

La vivienda está conformada en un solo bloque de un piso, con dos tipos de cubierta (1 y 2 caídas). La estructura principal es de bambú, con pórticos espaciales conformados de columnas de 4 culmos y celosías tipo monopitch y howe. Las paredes son mixtas con bambú y mortero por ambos lados. La cimentación de la estructura está constituida por zapatas aisladas de 1,00 m de lado, desplantadas a 1,00 m de profundidad, con una capacidad portante de 7 Tn/m<sup>2</sup>.

El modelamiento de la estructura completa se realizó a través del programa Etabs para corroborar la funcionalidad de todos los elementos estructurales y consecuentemente analizar su comportamiento en conjunto, ya que si bien es importante el correcto diseño éstos elementos que conforman la vivienda, también es pertinente modelar su acción dentro del campo constructivo ante posibles eventos críticos.

El modelamiento se lo realizó bajo la Norma Ecuatoriana de la Construcción Estructuras de Guadúa - GaK (NEC-SE-GUADÚA, 2016), en la cual se establece los parámetros de análisis que necesitan las estructuras de bambú empezando por el periodo de vibración, distribución de fuerzas laterales en las direcciones (X - Y), cargas, combinaciones de cargas, derivas de piso y deformaciones ante las fuerzas más críticas como las sísmicas. En la Figura 151 se puede visualizar en 3D el modelamiento estructural listo para ser cargado y analizado.



**Figura 151.** Modelamiento estructural 3D en Etabs para la vivienda N°1-prototipo social.

La estructura utilizo las cargas que se estipulan en la Tabla 85 y la combinación de cargas de la Tabla 86, mismas que se han subdividido en dos secciones (i) la primera se utiliza para generar la envolvente de todas las combinaciones de carga que permita obtener fuerzas axiales y momentos actuantes en columnas y vigas, mientras que (ii) la segunda se utiliza para generar la envolvente de las deflexiones diferidas.

**Tabla 85***Cargas para la estructura en Etabs*

Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Load
D	Dead	1	
L	Live	0	
Sc	Superimposed Dead	0	
W	Wind	0	ASCE 7-88
Ex	Seismic	0	User Coefficient
Ey	Seismic	0	User Coefficient

**Tabla 86***Combinaciones de cargas para el análisis del comportamiento estructural*

Envolvente 1		
<b>1</b>	D+Sc	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>2</b>	D+Sc+L	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>3</b>	D+Sc+0.75L+0.525Ex	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>4</b>	D+Sc+0.75L3-0.525Ex	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>5</b>	D+Sc+0.75L+0.525Ey	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>6</b>	D+Sc+0.75L3-0.525Ey	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>7</b>	D+Sc+0.7Ex	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>8</b>	D+Sc-0.7Ex	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>9</b>	D+Sc+0.7Ey	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>10</b>	D+Sc-0.7Ey	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>11</b>	D+Sc+0.75L+0.525EQx	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>12</b>	D+Sc+0.75L+0.525EQy	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>13</b>	D+Sc+0.7EQx	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>14</b>	D+Sc+0.7EQy	Normativa-NEC-SE-GAK-2015
<b>15</b>	D+Sc+0.6W	Normativa-NEC-SE-CG-2015
<b>16</b>	D+Sc+0.75L+0.45W	
Envolvente 2		
<b>2</b>	D+Sc+L	Deflexiones diferidas
<b>17</b>	2.8D+2.8Sc+1.3L	Deflexiones diferidas

### 6.5.9.1. Análisis de participación modal

El análisis modal se lo realiza para verificar los modos de vibración de la estructura, donde se garantiza un comportamiento “ideal” cuando el porcentaje de participación de la masa en el 1° y 2° modo producen desplazamiento puro en los ejes X o Y con un porcentaje lo más aproximado al 90%, mientras que en el 3° modo se produce torsión mayor o igual al 50%, tal como se detalló en la sección 6.5.5.4 (ver Tabla 75)

Luego de chequear la participación de la masa en la estructura, se procede a chequear los periodos de vibración fundamentales que se obtienen en el 1° y 2° modo a través de las Ecuaciones (32), (33) que propone la NEC-SE-CG 2015,

$$T_{mi} = C_t * h_n^\alpha \quad (32)$$

$$T_{m1} \leq T_a \leq T_{m2} \quad (33)$$

donde  $T_{mi}$  es periodo de vibración del rango permisible,  $C_t$  es el coeficiente que depende del tipo de edificio según la Tabla 87 y  $h_n$  es la altura de la edificación en  $n$  pisos medida desde la base de la estructura,  $T_a$  es el periodo fundamental de la estructura obtenido en el sentido X o Y.

**Tabla 87**

*Coeficiente  $C_t$  y  $\alpha$*

<b>Tipo de estructura</b>	<b><math>C_t</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>
<b><i>Estructuras de acero</i></b>		
Sin arriostramientos	0,072	0,8
Con arriostramientos	0,073	0,75
<b><i>Pórticos especiales de hormigón armado</i></b>		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0,055	0,9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural.	0,055	0,75

Fuente: NEC-SE-DS 2015

$$C_t = 0,055$$

$$\alpha = 0,9$$

$$Tm1 = 0,055 * 5,80^{0,9}$$

$$Tm1 = 0,268$$

$$Tm2 = 0,348$$

$$Ta = 0,283 \quad 1^\circ \text{ modo}$$

$$Ta = 0,286 \quad 2^\circ \text{ modo}$$

$$Tm1 (\text{Rígido}) \leq Ta \leq Tm2 (\text{Flexible})$$

Entonces:

$$0,268 \leq 0,283 \leq 0,348 \quad 1^\circ \text{ modo se encuentra en el rango óptimo}$$

$$0,268 \leq 0,286 \leq 0,348 \quad 2^\circ \text{ modo se encuentra en el rango óptimo}$$

### 6.5.9.2. Control de deformaciones

Para este control es necesario conocer los límites permisibles de las derivas de piso, tal como lo indica la Tabla 88. En las Figuras 152 y 153 se pueden observar las derivas de piso provocadas por la carga sísmica estática  $E_x$  y  $E_y$ .

#### Tabla 88

*Valores de  $\Delta M$  máximas expresados como fracción de la altura de piso*

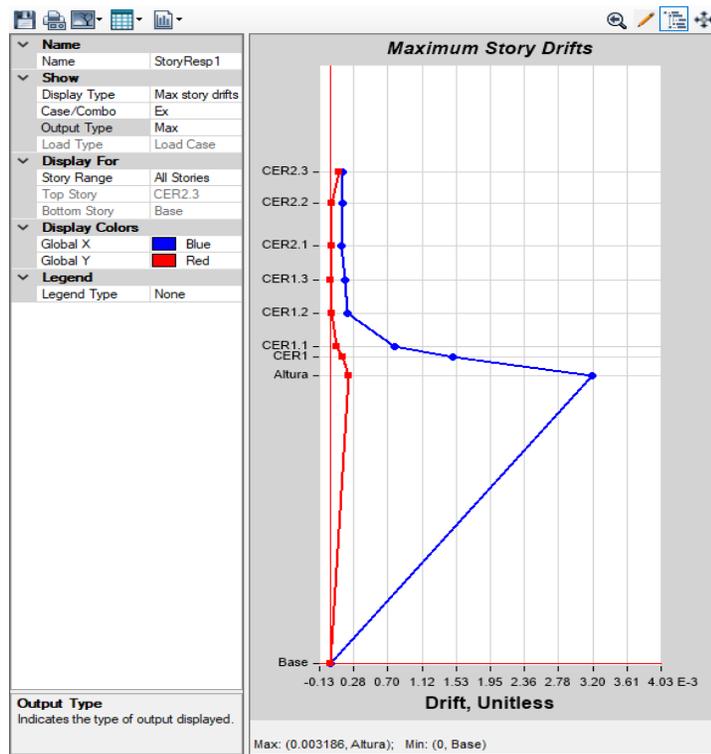
<b>Estructuras de</b>	<b><math>\Delta M</math> máxima</b>
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0,02
De mampostería	0,01

Fuente: NEC-SE-DS 2015

Límites de la deriva: la deriva máxima inelástica  $\Delta M$  de cada piso según la NEC-SE-DS 2015 debe calcularse mediante la Ecuación (34),

$$\Delta M = 0,75 * R * \Delta E \quad (34)$$

donde  $\Delta M$  es la deriva máxima inelástica,  $\Delta E$  es el desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducido y  $R$  es el factor de reducción de resistencia.



*Figura 152.* Máximas derivas de piso para el sismo estático Ex

$$\Delta E = 0,003186$$

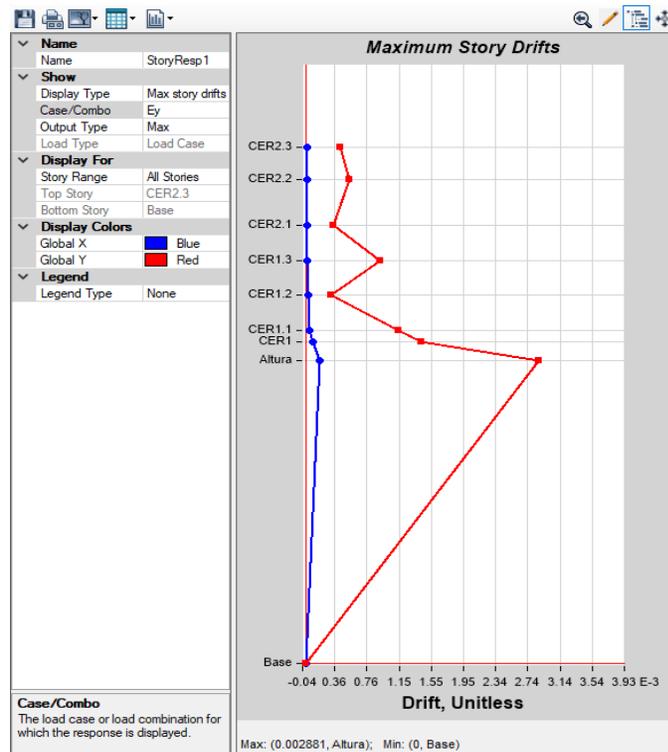
$$\Delta M = 0,75 * R * \Delta E$$

$$\Delta M = 0,75 * 2 * 0,003186$$

$$\Delta M = 0,004779$$

$$\Delta M < \Delta M \text{ máx}$$

$$\Delta M = 0,004779 < \Delta M \text{ máx} = 0,02 \text{ CUMPLE}$$



**Figura 153.** Máximas derivas de piso para el sismo estático Ey

$$\Delta E = 0,002881$$

$$\Delta M = 0,75 * R * \Delta E$$

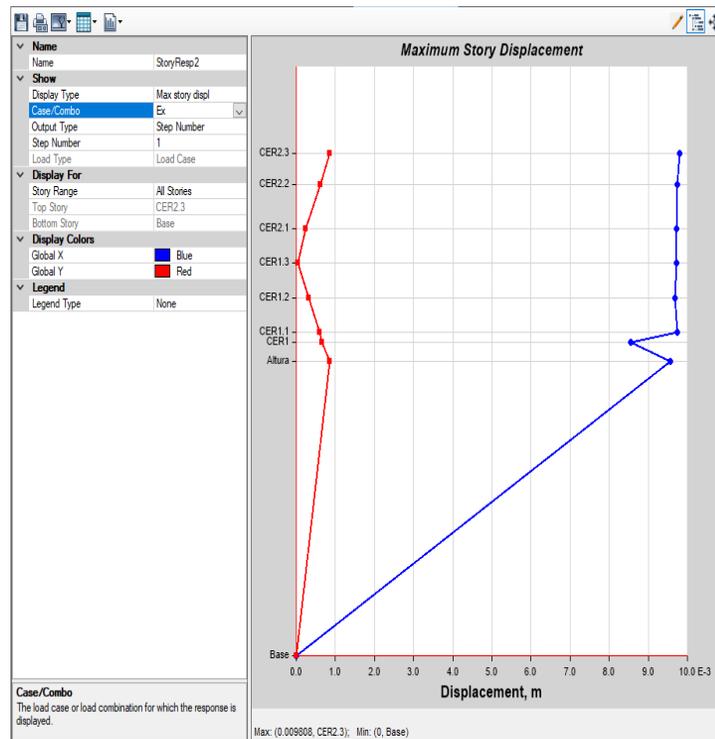
$$\Delta M = 0,75 * 2 * 0,002881$$

$$\Delta M = 0,004322$$

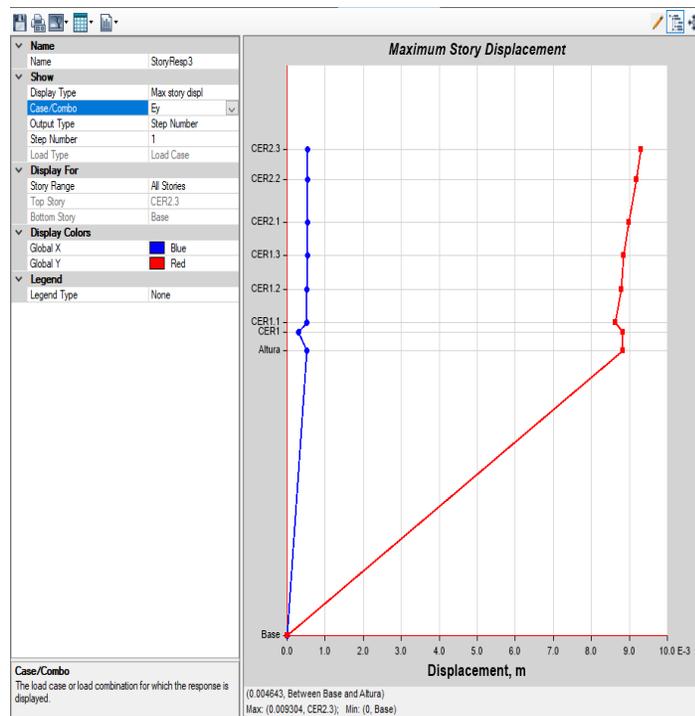
$$\Delta M < \Delta M \text{ máx}$$

$$\Delta M = 0,004322 < \Delta M \text{ máx} = 0,02 \text{ CUMPLE}$$

En cuanto a los desplazamientos, las Figuras 154 y 155 muestran que en la dirección X la estructura se desplazó **0,9808 cm** mientras que en la dirección Y fue de **0,9333 cm**.



**Figura 154.** Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ex



**Figura 155.** Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ey

### 6.5.9.3. Control de masas permanentes y sísmicas

Los últimos chequeos que se realizan al modelamiento para que su evaluación sea completa es el análisis de su “Lista de materiales por piso”, la misma que permite evaluar el peso propio de cada elemento de la estructura y comprobar que todos los datos ingresados estén interactuando, generando el peso total por carga permanente (ver Tabla 89)

**Tabla 89**

*Lista de materiales por nivel de la vivienda N°1*

Story	Element Type	Material	Total Weight tonf	# Pieces
CER2.3	Column	D.ASPER	0,03427	4
CER2.3	Beam	D.ASPER	0,0617	8
CER2.3	Brace	D.ASPER	0,07035	7
CER2.3	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	0,97934	
CER2.2	Column	D.ASPER	0,05092	7
CER2.2	Beam	D.ASPER	0,12566	8
CER2.2	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	1,51742	
CER2.1	Column	D.ASPER	0,03819	7
CER2.1	Beam	D.ASPER	0,02631	1
CER2.1	Brace	D.ASPER	0,12646	14
CER2.1	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	1,14454	
CER1.3	Column	D.ASPER	0,06062	15
CER1.3	Beam	D.ASPER	0,38024	25
CER1.3	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	3,93387	
CER1.2	Column	D.ASPER	0,06025	23
CER1.2	Beam	D.ASPER	0,15642	11
CER1.2	Brace	D.ASPER	0,25246	38
CER1.2	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	4,38266	
CER1.1	Column	D.ASPER	0,01818	15
CER1.1	Beam	D.ASPER	0,13593	17
CER1.1	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	2,17936	
CER1	Column	D.ASPER	0,00614	8
CER1	Beam	D.ASPER	0,03285	1
CER1	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	0,74167	
Altura	Column	D.ASPER	0,87288	18
Altura	Beam	D.ASPER	0,90674	73
SUM	Column	D.ASPER	1,14145	97
SUM	Beam	D.ASPER	1,82585	144
SUM	Brace	D.ASPER	0,44927	59
SUM	Floor	LOSETA-ESTER-180kg/m2	14,87887	
<b>TOTAL</b>	<b>ALL</b>	<b>ALL</b>	<b>18,29544</b>	<b>300</b>

La Tabla 90 por su parte presenta la carga autosísmica provocada por el usuario para simular un evento crítico al que estará expuesta la estructura, indicando el peso adicional que le provoca cuando interviene el sismo estático.

**Tabla 90***Auto-sísmica por coeficientes de usuario*

<b>Load Pattern</b>	<b>Type</b>	<b>Direction</b>	<b>Eccentricity</b>	<b>C</b>	<b>K</b>	<b>Weight Used</b>	<b>Base Shear</b>
			<b>%</b>			<b>tonf</b>	<b>tonf</b>
Ex	Seismic	X		0,431	0,9	22,1536	9,5482
Ex	Seismic	X + Ecc. Y	5	0,431	0,9	22,1536	9,5482
Ex	Seismic	X - Ecc. Y	5	0,431	0,9	22,1536	9,5482
Ey	Seismic	Y		0,431	0,8995	22,1536	9,5482
Ey	Seismic	Y + Ecc. X	5	0,431	0,8995	22,1536	9,5482
Ey	Seismic	Y - Ecc. X	5	0,431	0,8995	<b>22,1536</b>	9,5482

El control para esta sección es verificar que el peso total causado por carga sísmica de la Tabla 90 sea mayor que el peso total de la estructura completa (ver Tabla 89), de esta manera se confirma que la estructura se ha diseñado correctamente, y por tanto sus valores de respuesta tienen datos bastante aproximados a la realidad.

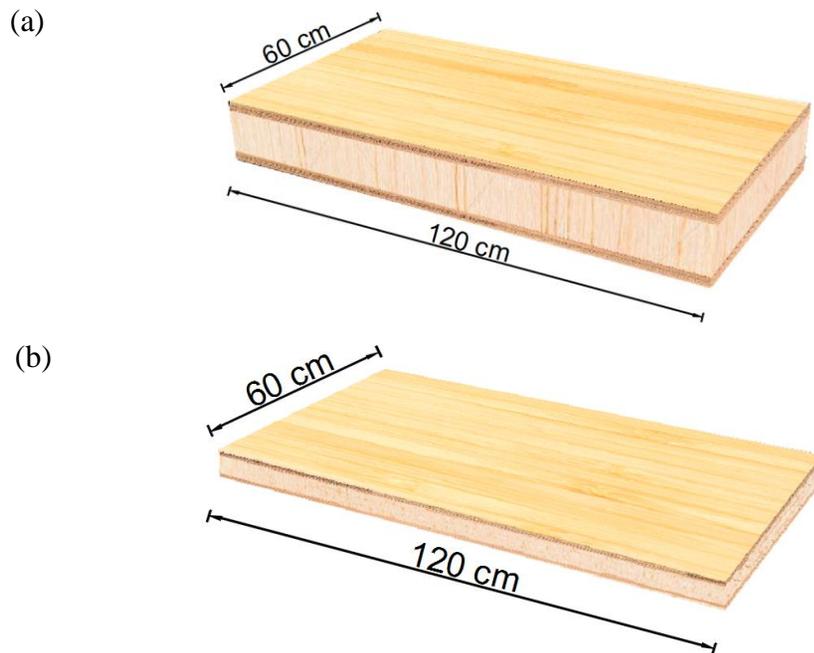
$$\text{Tabla 89} = \mathbf{18,295 \text{ Tnf}} < \text{Tabla 90} = \mathbf{22,154 \text{ Tnf}} \quad \mathbf{CUMPLE}$$

## **6.6. Cálculo estructural de la Vivienda N°2 – Prototipo particular**

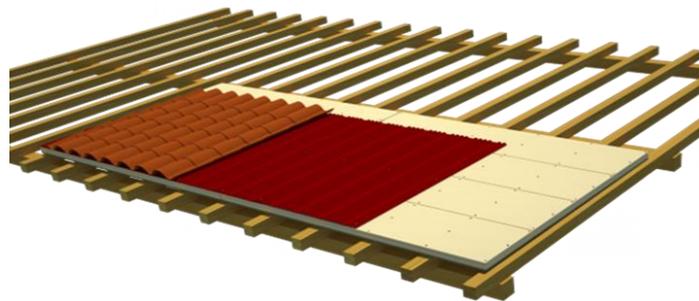
### **6.6.1. Detalles arquitectónicos**

El diseño arquitectónico presenta una vivienda unifamiliar de 2 plantas enfocado con carácter particular, éste posee un total de 217 m<sup>2</sup> de construcción distribuidos en (i) 100 m<sup>2</sup> para la planta baja que se compone de sala, comedor, cocina independiente, baño social, cuarto de estudio y área de lavado; mientras que (ii) la planta alta posee 117 m<sup>2</sup> y consta de 1 dormitorio master con baño completo propio, 2 dormitorios secundarios con baño completo compartido, sala de TV y amplia terraza ajardinada. En el Anexo 12 se presentan los planos en planta y fachadas (considerando vistas frontales, posteriores y laterales respectivamente).

Nuevamente, el material principal estructural estará a cargo del *D. asper* de la presente investigación. La losa de entrepiso será de hormigón estructural con acabados de piso flotante. Las fachadas y mamposterías constarán de tableros estructurales compuestos tipo sándwich [núcleo de balsa y paneles externos de bambú (ver Figura 156)] pintados de color blanco en los ambientes que se crea necesario, además se contará con una pared ajardinada. La cubierta se armará en dos modelos de caídas con estructura y correas de madera, en donde se asentarán tejas tipo española (ver Figura 157). Todos estos materiales y técnicas constructivas en conjunto dejarán notar una construcción mixta estéticamente agradable, ecológica, sostenible, y con grandes potenciales estructurales.



**Figura 156.** Tableros tipo sándwich compuesto de balsa y bambú para (a) paredes exteriores (espesor=124 mm) y (b) paredes interiores (espesor=74mm)  
Fuente: Andino (2019)



**Figura 157.** Modelo de cubierta para la vivienda N° 2

### 6.6.2. Carga de viento

El cálculo de la velocidad de diseño para viento se la obtiene con los mismos parámetros indicados en la sección 6.5.2. Para la vivienda N°2, la velocidad del viento obtendrá a través la Ecuación (23) y las condiciones del lugar de construcción se asume que sean las mismas que la vivienda N°1 (ver Tabla 58).

Altura de la vivienda N° 2 = 9,30 m

$\sigma = 0,90$  (Categoría B, obstrucción es baja en el sector de Quevedo)

$$Vb = V * \sigma$$

$$Vb = 21 \frac{m}{s} * 0,90$$

$$Vb = 18,75 \frac{m}{s}$$

### 6.6.2.1. Cálculo de la presión del viento

La acción del viento sobre los elementos de fachada se analiza a través de la Ecuación (24).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * Vb^2 * C_e * C_f$$

$$\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3} \text{ (densidad del aire)}$$

$$C_e = 1,30 \text{ (ver Tabla 59)}$$

$$C_f = +0,40 / -0,60 \text{ Superficies inclinadas tienen } 16,70^\circ \text{ y } 15,64^\circ \text{ (ver Tabla 60)}$$

#### Barlovento

$$P = \frac{1}{2} * 1,25 * 18,75^2 * 1,30 * 0,40$$

$$P = 114,09 \frac{N}{m^2} \cong 11,64 \frac{kg}{m^2} \text{ Carga de viento en presión para la cubierta}$$

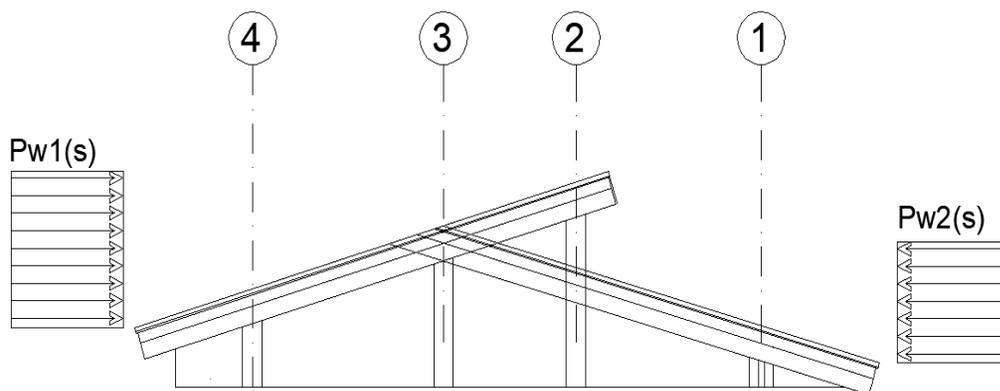
#### Sotavento

$$P = \frac{1}{2} * 1,25 * 18,75^2 * 1,30 * -0,60$$

$$P = -171,29 \frac{N}{m^2} \cong -17,46 \frac{kg}{m^2} \text{ Carga de viento en succión para la cubierta}$$

### 6.6.2.2. Resultados de cargas en barlovento y sotavento

Se presenta en la Figura 158 la distribución de la carga de viento para las cubiertas en análisis y en función de la altura más crítica a la que se encuentran se deberá aplicar los coeficientes para la presión del viento (ver Tabla 61), consecuentemente se obtiene en la Tabla 91 los resultados de carga horizontal.



**Figura 158.** Distribución de carga de viento en ambas cubiertas de la vivienda N°2

**Tabla 91**

*Resultados de carga horizontal (presión del viento) en cubiertas*

1,12 <sup>2</sup>		5 m ≤ H ≤ 10 m		
Presión de viento	Cubierta I		Cubierta II	
	Carga horizontal (kg/m <sup>2</sup> )	Carga proyectada (kg/m <sup>2</sup> )	Carga horizontal (kg/m <sup>2</sup> )	Carga proyectada (kg/m <sup>2</sup> )
Barlovento			14,60	<b>3,94</b>
Sotavento	21,90	<b>6,29</b>		

### 6.6.3. Carga Sísmica

Utilizando los lineamientos de la sección 6.5.3 se procede al cálculo del espectro de diseño por el Método 1 basado en fuerzas (ver Tabla 92).

**Tabla 92***Espectro elástico de diseño en aceleraciones (NEC-SE-DS, 2015)*

Parámetro	Variable	Valor	Unidades	Referencia
Factor de importancia	<b>I</b>	1,00	s.u	Tabla 6, sección 4.1
Factor de reducción de respuesta	<b>R</b>	2,00	s.u	sección 6.3.3 (b)
Zonificación sísmica	<b>IV</b>			
Región del Ecuador	Quevedo, Los Ríos			
Factor de aceleración de la zona sísmica	<b>Z</b>	0,35	s.u	Tabla 1, sección 3.1.1
Relación de amplificación espectral	<b>n</b>	1,80	s.u	sección 3.3
Coefficiente Ct	<b>Ct</b>	0,055	s.u	sección 6.3.3 (a)
Altura total del elemento	<b>hn</b>	21,00	m	sección 6.3.3 (a)
Coefficiente para cálculo de periodo	<b>α</b>	0,90	s.u	sección 6.3.3 (a)
Tipo de suelo		C		
Factor de sitio Fa	<b>Fa</b>	1,23	s.u	Tabla 3, sección 3.2.2 ( a )
Factor de sitio Fd	<b>Fd</b>	1,15	s.u	Tabla 4, sección 3.2.2 ( b )
Factor de comportam. inelástico suelo	<b>Fs</b>	1,06	s.u	Tabla 5, sección 3.2.2 ( c )
Factor asociado al periodo de retorno	<b>r</b>	1,00	s.u	sección 3.3
Factor de irregularidad en planta	<b>Øp</b>	0,90	s.u	sección 5.2.1
Factor de irregularidad en elevación	<b>Øe</b>	1,00	s.u	sección 5.2.1
Aceleración de la gravedad	<b>g</b>	9,81	m/s <sup>2</sup>	
Período teórico método 1	<b>T1</b>	0,852	s	sección 3.4.2
Período teórico método 1 mayorado	<b>T2</b>	1,107	s	sección 3.4.2
Período fundamental dirección x	<b>Tx</b>	0,231	s	ETABS
Período fundamental dirección y	<b>Ty</b>	0,225	s	ETABS
Periodo límite en T=To	<b>To</b>	0,099	s	sección 3.3.1
Periodo límite T= Tc	<b>Tc</b>	0,545	s	sección 3.3.1
Periodo límite en T=TL	<b>TL</b>	2,760	s	sección 3.3.1
Aceleración en T=0	<b>Sa</b>	0,431	g	sección 3.3.1
Aceleración en T=To	<b>Sa<sub>o</sub></b>	0,775	g	sección 3.3.1

Para la vivienda N°2 – prototipo particular, se asumió las mismas condiciones de suelo de la ciudad de Quevedo, Los Ríos, se consideró tipo C; bajo esos parámetros y mediante los datos obtenidos en la Tabla 92, se determinó que los resultados de la gráfica del espectro elástico y el reducido (espectro de diseño) son los mismos que la Figura 121 (resultado de la Tabla 64).

### 6.6.3.1. Cortante basal de diseño (V)

Para calcular el cortante basal del diseño se procede a utilizar la Ecuación (29).

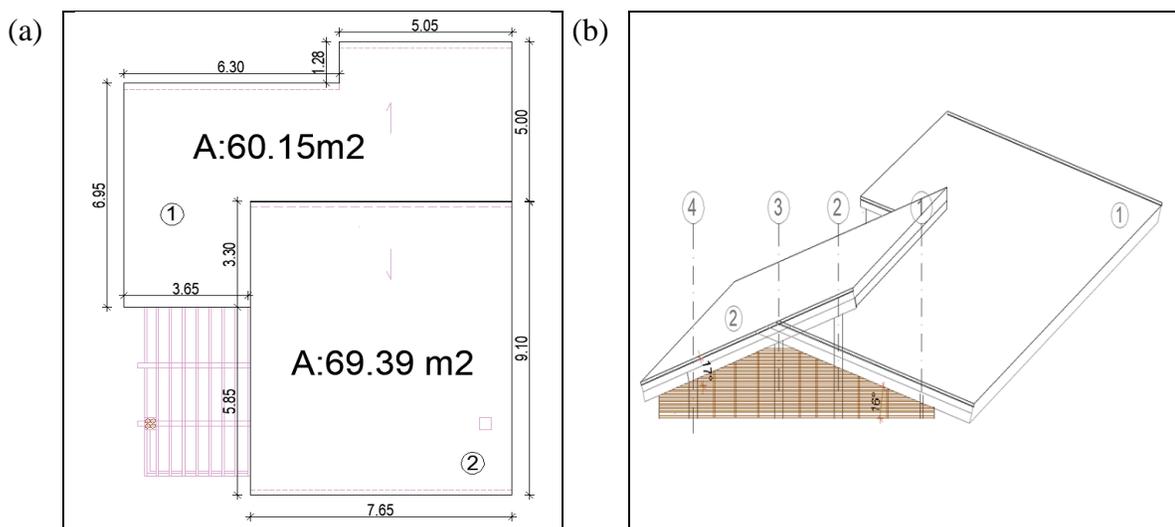
$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R * \phi_P * \phi_E} * W$$

$$V = \frac{1 * 0,775}{2 * 0,9 * 1} W$$

$$V = 0,4305 * W$$

#### 6.6.4. Diseño de cubierta

Para iniciar con el diseño de cubierta será necesario conocer las dimensiones de este elemento, el cual cuenta con un área total de 129,54 m<sup>2</sup>, subdividido en dos zonas características de diferentes alturas de caída; (i) la primera pertenece a un tipo de cubierta de una sola caída (área de 60,15 m<sup>2</sup>) ubicada en la mitad posterior de la vivienda (incluye dormitorio individual 2, dormitorio master con su cuarto de baño) con ángulo de inclinación de 16,70° y (ii) la segunda también es una cubierta de una sola caída (área de 69,39 m<sup>2</sup>) ubicada en la mitad frontal de la vivienda (incluye sala de TV, dormitorio individual 1, baño compartido y hall de planta alta) permitiendo una alta ventilación por poseer una mayor altura, su ángulo de inclinación es de 15,64° (ver Figura 159).



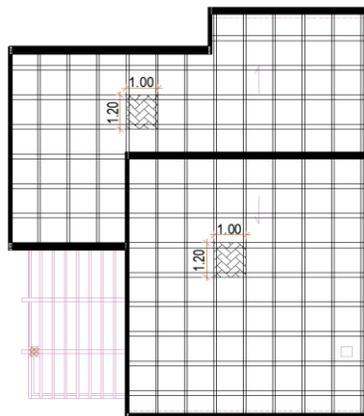
**Figura 159.** Disposición de la cubierta de la vivienda N°2  
(a) vista en planta y (b) vista en elevación

#### 6.6.4.1. Elementos de cubierta

La cubierta contará en su estructura con el aporte del peso propio de las vigas de bambú (configuración de 2 culmos) apoyadas en columnas y tableros estructurales, luego se armarán en sentido transversal el conjunto de viguetas de madera grupo A, para luego montar las correas de madera grupo C, que es donde finalmente se asentarán las tejas tipo española. Los materiales no estructurales considerados son: entablado de 22 mm grupo B, lámina impermeabilizante Techofielt 2000, aislante térmico o espuma de insolación, Gypsum, masilla, accesorios de cubierta, instalaciones de iluminación, accesorios para canales y la sobrecarga (carga temporal).

#### 6.6.4.2. Análisis de cargas

Para este análisis fue necesario compilar información del peso que provoca la carga permanente (perteneciente a todos los materiales utilizados en la cubierta) y la carga temporal (perteneciente a la sobrecarga o viva) que actúan sobre la estructura de cubierta de acuerdo a la distribución de carga asignada por el ancho cooperante al que fueron dispuestas las tejas (ver Figura 160).



**Figura 160.** Armado de la estructura de cubierta

- Vigas de bambú = 6,72 kg/m<sup>2</sup>
- Viguetas de madera Grupo A = 28,80 kg/m<sup>2</sup>
- Correas de madera Grupo C 4x8cm = 3,24 kg/m<sup>2</sup>
- Entablado 22 mm Grupo B = 15,00 kg/m<sup>2</sup>
- Lámina impermeabilizante Techofielt 2000 = 2,60 kg/m<sup>2</sup>
- Aislante térmico o espuma de insolación = 5,85 kg/m<sup>2</sup>
- Teja española (1.34 x 1.36) m= 14,88 kg/m<sup>2</sup>
- Gypsum (244x122x12) mm= 9,80 kg/m<sup>2</sup>
- Masilla = 28,00 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones de cubierta = 1,80 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones de iluminación = 5,00 kg/m<sup>2</sup>
- Accesorios para canaletas = 5,00 kg/m<sup>2</sup>
- Carga temporal = 100,00 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 121,84 kg/m<sup>2</sup>**

#### **6.6.4.3. Diseño de correas (Cubiertas 1 y 2)**

Para el diseño de estos elementos de cubierta se tomará únicamente los materiales que les aportan carga:

##### **Carga permanente**

$$D_c = 3,24 + 15,00 + 2,60 + 5,85 + 14,88 + 1,80 = 43,37 \text{ kg/m}^2$$

##### **Carga temporal**

$$L_c = 100 \text{ kg/m}^2$$

##### **Carga total**

$$DL = 43,37 + 100 = 143,37 \text{ kg/m}^2$$

### Proyección de carga DL

$$PDL = DL * \text{COS}(\theta)$$

$$PDL = 143,37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(16,70^\circ) \text{ inclinación de cubierta 1}$$

$$PDL = 137,32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$PDL = 143,37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(15,64^\circ) \text{ inclinación de cubierta 2}$$

$$PDL = 138,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

### Proyección de presión del viento

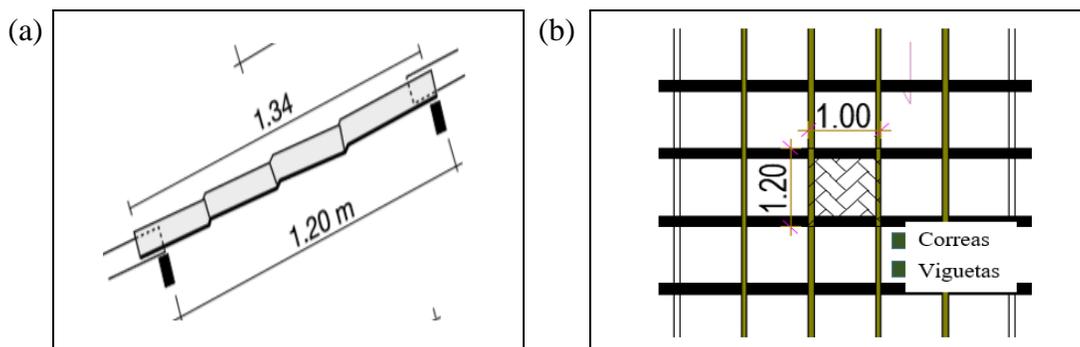
$P_w$  = Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 1)

$$P_{ws} = 6,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$P_w$  = Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 2)

$$P_{wb} = 3,94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Ancho cooperante ( $A_c$ )= 1,00 m. Ancho útil de la teja española (ver Figura 161)



**Figura 161.** Ancho cooperante de las tejas españolas apoyadas sobre las correas (a) disposición de las tejas sobre las correas (b) área útil de colocación de teja

**CUBIERTA 1**

$$Wt = (PDL + Pws) * Ac$$

$$Wt = (137,32 + 6,29) \frac{kg}{m^2} * 1,00 m$$

$$WT1 = 143,62 \frac{kg}{m}$$

**CUBIERTA 2**

$$Wt = (PDL + Pwb) * Ac$$

$$Wt = (137,72 + 3,94) \frac{kg}{m^2} * 1,00 m$$

$$WT2 = 141,31 \frac{kg}{m}$$

Considerando que la carga permanente, la carga temporal y la carga viento en sotavento de la cubierta 1 es 1,02 veces mayor que la carga sobre la cubierta 2; entonces es razonable mantener la sección de correas para ambos elementos de cubierta.

**6.6.4.3.1. Control de diseño**

**Paso 1:** Predimensionamiento. Recomendaciones para construir con madera (Queipo de Llano Moya et al., 2010)

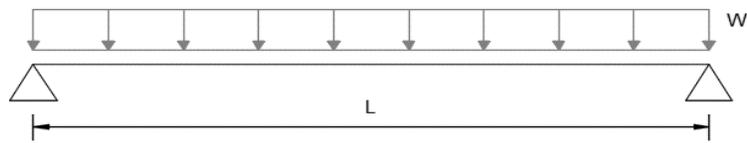
$$h = 0,08 m \text{ Geometría para correas}$$

$$h = 0,04 m \text{ Geometría para correas}$$

$$\text{espaciamiento} = 1,00 m$$

$$WT = 143,62 \frac{kg}{m}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la correa (simplemente apoyada, ver Figura 162)



**Figura 162.** Esquema de Vigueta simplemente apoyada

Longitud de correa = 1,20 m

$$MOE - prom(\text{Grupo C}) = 900000000 \frac{kg}{m^2}$$

$$I = 1,707 * 10^{-6} m^4$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * 143,62 * 1,20^4}{384 * 900000000 * 1,707 * 10^{-6}}$$

$$\Delta_{max} = 0,0025 m$$

**Propósito residencial (baja y media densidad ) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{1,20}{300} = 0,004 m$$

$$\Delta_{max} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,0025 m \leq 0,004 m \text{ CUMPLE}$$

**Paso 3:** Determinación de momentos y cortantes (ver Figura 163)

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2}$$

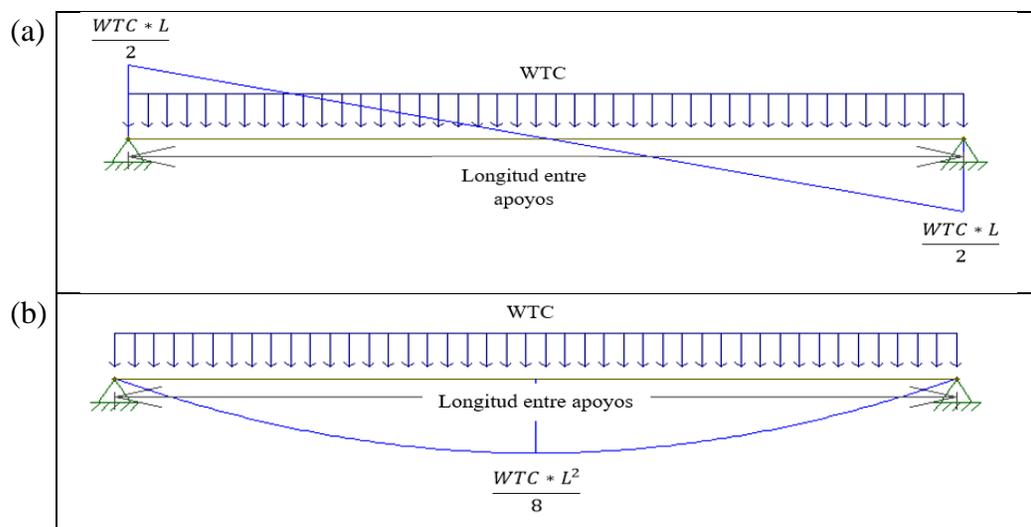
$$V_{max} = \frac{143,62 * 1,20}{2}$$

$$V_{max} = 86,17 kgf = 0,086 Tnf$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{143,62 * 1,20^2}{8}$$

$$M_{max} = 25,85 \text{ kgf} - m = 0,026 \text{ Tnf} - m$$



**Figura 163.** Viga simplemente apoyada con carga distribuida  
(a) diagrama de cortantes y (b) diagrama de momentos

**Paso 4:** Determinación de esfuerzos admisibles (JUNAC, 1984).

#### **Madera Grupo C**

$$\sigma_{adm-flex} = 1100000 \text{ kg/m}^2 \text{ (10\% incluido)}$$

$$\sigma_{adm-comp} = 800000 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_{adm-corte} = 88000 \text{ kg/m}^2 \text{ (10\% incluido)}$$

**Paso 5:** Momento de inercia necesario por limitación de deflexiones

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I} \leq \frac{L}{K}$$

$$I_{necesario} > \frac{5 * WT * L^3}{384 * MOE}$$

$$MOE - prom(\text{Grupo C}) = 900000000 \frac{kg}{m^2}$$

$$I \text{ necesario} > \frac{5 * 143,62 * 1,20^3}{384 * 900000000}$$

**Cuando se utiliza cielo raso o de yeso (K)**

$$\text{Carga actuante} + \text{sobrecarga} = \frac{L}{300}$$

$$K = 300$$

$$I \text{ necesario} = 1,077 * 10^{-6} m^4$$

$$I \text{ requerido} = 1,707 * 10^{-6} m^4$$

$$I \text{ necesario} < I \text{ requerido}$$

$$1,077 * 10^{-6} m^4 < 1,707 * 10^{-6} m^4 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo del módulo de sección

$$Z \text{ requerido} = \frac{1}{6} * b * h^2$$

$$Z \text{ requerido} = \frac{1}{6} * 0,04 * 0,08^3$$

$$Z \text{ requerido} = 4,267 * 10^{-5} m^3 = 42,67 \text{ cm}^3$$

$$Z \text{ necesario} = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm-flex}}$$

$$Z \text{ necesario} = \frac{25,85 \text{ kg} - m}{1100000 \text{ kg}/m^2}$$

$$Z \text{ necesario} = 2,35 * 10^{-5} m^3 = 23,50 \text{ cm}^3$$

$$Z \text{ necesario} < Z \text{ requerido}$$

$$23,50 \text{ cm}^3 < 42,67 \text{ cm}^3 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 7:** Análisis de deformaciones diferidas.

Únicamente se utilizará la carga muerta

$$D = 43,37 \frac{kg}{m^2}$$

$$D - \text{Lineal} = 43,37 \frac{kg}{m^2} * 1,00 m = 43,37 \frac{kg}{m}$$

$$D - \text{proyectada} = 41,54 \frac{kg}{m^2}$$

$$WTC - 1.1 = 41,54 \frac{kg}{m^2}$$

**Momento Máximo**

$$M_{max-1.1} = \frac{WTC * L^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = \frac{41,54 * 1,20^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = 7,48 \text{ kgf} - m$$

**Esfuerzo Máximo**

$$\sigma = \frac{M_{max-1.1}}{Z \text{ requerido}}$$

$$\sigma = \frac{7,48 \text{ kgf} - m}{4,267 * 10^{-5} m^3}$$

$$\sigma = 175233,19 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma \leq (0,5 - 0,8) \sigma_{adm-flex}$$

Dependiendo el tipo de material se selecciona el factor sin mayorar el esfuerzo.

Al ser una madera tipo C se elige 0.6 con el objetivo de no ingresar en el extremo límite.

$$\sigma \leq (0,6) \sigma_{adm-flex}$$

$$\sigma \leq (0,6) 1100000 \text{ kg/m}^2$$

$$175233,19 \text{ kg/m}^2 \leq 660000 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 8:** Verificación del esfuerzo cortante

$$WT * h = 143,62 \frac{kgf}{m^2} * 0,08 m$$

$$WT * h = 11,49 kgf$$

$$WT * h \leq V_{max}$$

$$V_{max} = 86,17 kgf$$

$$11,49 kgf \leq 86,17 kgf \quad \text{CUMPLE}$$

Análisis del cortante en la sección crítica

$$\tau = \frac{1,5 * (WT * h)}{b * h}$$

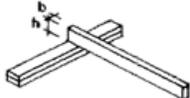
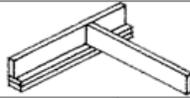
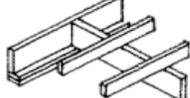
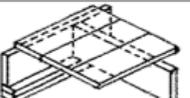
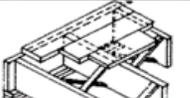
$$\tau = \frac{1,5 * (11,49)}{0,08 * 0,04}$$

$$\tau = 5385,65 \frac{kg}{m^2}$$

$$\tau \leq \sigma_{adm-corte}$$

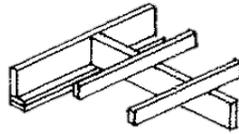
$$5385,65 kg/m^2 \leq 88000 kg/m^2 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 9:** Verificación de estabilidad lateral a través de la Figura 164

Elementos	Relación	Análisis
	2	No se necesita apoyo lateral
	3	Restricción del desplazamiento lateral en apoyos (traslación y rotación)
	4	Restricción del desplazamiento lateral en apoyos; elemento mantenido en posición por correas o viguetas
	5	Restricción del desplazamiento lateral en apoyos; borde en compresión conectado directamente con entablado o viguetas
	6	Adicionalmente a los requisitos para h/b=5; colocar arriostramiento cruzado entre los elementos menores que 8 veces su ancho

**Figura 164.** Estabilidad lateral

Fuente: Tabla 8.6 (JUNAC, 1984)



$$\frac{h}{b} = \frac{0,08}{0,04} = 2$$

*Restricción del desplazamiento lateral en apoyos, elemento mantenido en posición por correas o viguetas debido a su configuración.*

**Paso 10:** Verificación de la longitud de apoyo

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$R = V_{m\acute{a}x}$$

$$a = 0,002692824 \text{ m}$$

$$b = 0,040 \text{ m}$$

$$a \leq b$$

$$0,0026 \leq 0,04 \text{ CUMPLE}$$

### Conclusión

Al observar la inercia y el módulo de sección requerido y necesario respectivamente, se puede concluir que el elemento se encuentra sobredimensionado hasta 1,80 veces; con lo que se podría aumentar el espaciamiento entre estos elementos o disminuir la sección; sin embargo las características geométricas de la estructura de cubierta requiere esta aplicación, por otro lado las dimensiones comerciales limitan la disminución de sección.

#### 6.6.4.4. Diseño de viguetas (Cubiertas 1 y 2)

Para el diseño de estos elementos de cubierta se tomará únicamente los materiales que les aportan carga:

##### Carga permanente

$$D_c = 28,80 + 3,24 + 15,00 + 2,60 + 5,85 + 14,88 + 9,80 + 28,00 + 1,80 + 5,00 + 0,15$$

$$D_c = 115,12 \text{ kg/m}^2$$

##### Carga temporal

$$L_c = 100 \text{ kg/m}^2$$

##### Carga total

$$DL = 115,12 + 100 = 215,12 \text{ kg/m}^2$$

##### Proyección de carga DL

$$PDL = DL * \text{COS}(\theta)$$

$$PDL = 215,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(16,70^\circ) \text{ inclinación de cubierta 1}$$

$$PDL = 206,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$PDL = 215,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(15,64^\circ) \text{ inclinación de cubierta 2}$$

$$PDL = 207,15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

##### Proyección de presión del viento

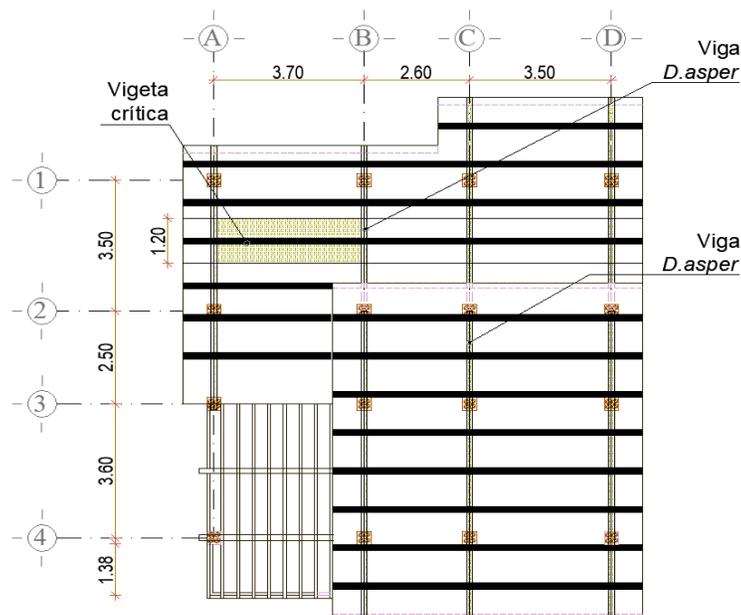
$P_w =$  Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 1)

$$P_{ws} = 6,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$P_w$  = Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 2)

$$P_{wb} = 3,94 \frac{kg}{m^2}$$

Ancho cooperante ( $A_c$ )= 1,20 m. Largo útil de la teja española (ver Figura 165)



**Figura 165.** Ancho cooperante de las viguetas (deben coincidir con el largo útil de las tejas)

### CUBIERTA 1

$$W_t = (PDL + P_{ws}) * A_c$$

$$W_t = (206,05 + 6,29) \frac{kg}{m^2} * 1,20 m$$

$$WT1 = 254,88 \frac{kg}{m}$$

### CUBIERTA 2

$$W_t = (PDL + P_{wb}) * A_c$$

$$W_t = (207,15 + 3,29) \frac{kg}{m^2} * 1,20 m$$

$$WT2 = 252,53 \frac{kg}{m}$$

Considerando que la carga permanente, la carga temporal y la carga viento en sotavento de la cubierta 1 es 1,01 veces mayor que la carga sobre la cubierta 2; entonces es razonable mantener la sección de viguetas para ambos elementos de cubierta.

#### 6.6.4.4.1. Control de diseño

**Paso 1:** Predimensionamiento. Recomendaciones para construir con madera (Queipo de Llano Moya et al., 2010)

$$h = 0,165 \text{ m Geometría para viguetas}$$

$$h = 0,165 \text{ m Geometría para viguetas}$$

$$\text{espaciamiento} = 1,20 \text{ m}$$

$$WT = 254,88 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la vigueta (simplemente apoyada, ver Figura 162)

$$\text{Longitud de vigueta} = 3,70 \text{ m}$$

$$MOE - \text{prom (Grupo A)} = 1300000000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$I = 6,177 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * 254,88 * 3,70^4}{384 * 1300000000 * 6,177 * 10^{-6}}$$

$$\Delta_{max} = 0,0077 \text{ m}$$

**Propósito residencial (baja y media densidad) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{3,70}{300} = 0,012 \text{ m}$$

$$\Delta_{max} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,0077 \text{ m} \leq 0,012 \text{ m} \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 3:** Determinación de momentos y cortantes (ver Figura 163)

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2}$$

$$V_{max} = \frac{254,88 * 3,70}{2}$$

$$V_{max} = 471,52 \text{ kgf} = 0,472 \text{ Tnf}$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{254,88 * 3,70^2}{8}$$

$$M_{max} = 436,16 \text{ kgf} - m = 0,436 \text{ Tnf} - m$$

**Paso 4:** Determinación de esfuerzos admisibles (JUNAC, 1984).

#### **Madera Grupo A**

$$\sigma_{adm-flex} = 2310000 \text{ kg/m}^2 \text{ (10% incluido)}$$

$$\sigma_{adm-comp} = 1450000 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_{adm-corte} = 165000 \text{ kg/m}^2 \text{ (10% incluido)}$$

**Paso 5:** Momento de inercia necesario por limitación de deflexiones

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I} \leq \frac{L}{K}$$

$$I_{necesario} > \frac{5 * WT * L^3}{384 * MOE}$$

$$I_{\text{necesario}} > \frac{5 * 254,88 * 3,70^3}{384 * 1300000000}$$

**Cuando se utiliza cielo raso o de yeso (K)**

$$Carga\ actuante + sobrecarga = \frac{L}{300}$$

$$K = 300$$

$$I_{\text{necesario}} = 5,603 * 10^{-5} m^4$$

$$I_{\text{requerido}} = 6,177 * 10^{-5} m^4$$

$$I_{\text{necesario}} < I_{\text{requerido}}$$

$$5,603 * 10^{-5} m^4 < 6,177 * 10^{-5} m^4 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo del módulo de sección

$$Z_{\text{requerido}} = \frac{1}{6} * b * h^2$$

$$Z_{\text{requerido}} = \frac{1}{6} * 0,165 * 0,165^2$$

$$Z_{\text{requerido}} = 7,48 * 10^{-4} m^3 = 748,69 \text{ cm}^3$$

$$Z_{\text{necesario}} = \frac{M_{\text{max}}}{\sigma_{\text{adm-flex}}}$$

$$Z_{\text{necesario}} = \frac{436,16 \text{ kg} - m}{2310000 \text{ kg}/m^2}$$

$$Z_{\text{necesario}} = 1,89 * 10^{-4} m^3 = 188,81 \text{ cm}^3$$

$$Z_{\text{necesario}} < Z_{\text{requerido}}$$

$$188,81 \text{ cm}^3 < 748,69 \text{ cm}^3 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 7:** Análisis de deformaciones diferidas.

Únicamente se utilizará la carga muerta

$$D = 115,12 \frac{\text{kg}}{m^2}$$

$$D - \text{Lineal} = 115,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 1,20 \text{ m} = 138,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$D - \text{proyectada} = 132,31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$WTC - 1.1 = 132,32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

### **Momento Máximo**

$$M_{\text{max}-1.1} = \frac{WTC * L^2}{8}$$

$$M_{\text{max}-1.1} = \frac{132,32 * 3,70^2}{8}$$

$$M_{\text{max}-1.1} = 226,43 \text{ kgf} - \text{m}$$

### **Esfuerzo Máximo**

$$\sigma = \frac{M_{\text{max}-1.1}}{Z \text{ requerido}}$$

$$\sigma = \frac{226,43 \text{ kgf} - \text{m}}{7,48 * 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 302717,46 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma \leq (0,5 - 0,8) \sigma_{\text{adm-flex}}$$

Dependiendo el tipo de material se selecciona el factor sin mayorar el esfuerzo.

$$\sigma \leq (0,6) \sigma_{\text{adm-flex}}$$

$$\sigma \leq (0,6) 2310000 \text{ kg/m}^2$$

$$302717,46 \text{ kg/m}^2 \leq 1260000 \text{ CUMPLE}$$

### **Paso 8:** Verificación del esfuerzo cortante

$$WT * h = 254,88 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} * 0,165 \text{ m}$$

$$WT * h = 42,05 \text{ kgf}$$

$$WT * h \leq V_{\text{max}}$$

$$V_{max} = 471,52 \text{ kgf}$$

$$42,05 \text{ kgf} \leq 471,52 \text{ kgf} \text{ **CUMPLE**}$$

Análisis del cortante en la sección crítica

$$\tau = \frac{1,5 * (WT * h)}{b * h}$$

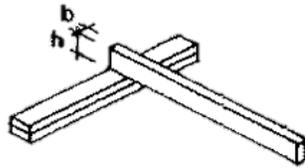
$$\tau = \frac{1,5 * (42,05)}{0,165 * 0,165}$$

$$\tau = 2317,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\tau \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$2317,06 \text{ kg/m}^2 \leq 165000 \text{ kg/m}^2 \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 9:** Verificación de estabilidad lateral a través de la Figura 164



$$\frac{h}{b} = \frac{0,165}{0,165} = 1$$

*No necesita apoyo lateral*

**Paso 10:** Verificación de la longitud de apoyo

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$R = V_{m\acute{a}x}$$

$$a = 0,001970837 \text{ m}$$

$$b = 0,165 \text{ m}$$

$$a \leq b$$

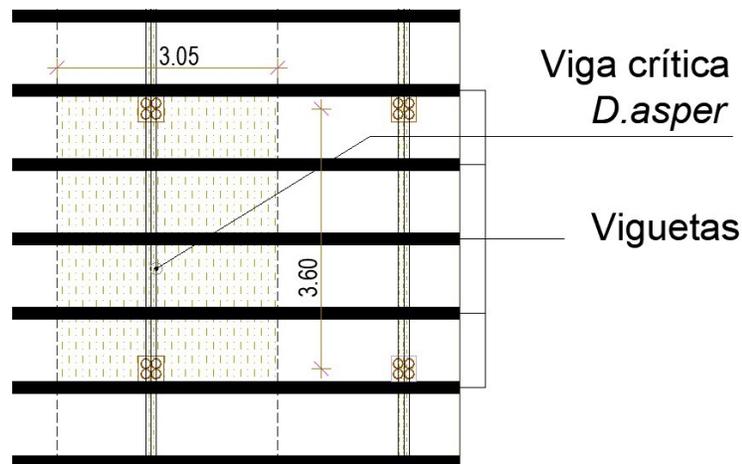
$$0,00197 \leq 0,165$$

### Conclusión

Destacando el mismo análisis realizado sobre las correas se ha encontrado que el elemento está sobredimensionado hasta 1,80 veces; sin embargo, debido a la conformación física y comercial del acabado de cubierta se requiere mantener esta configuración.

#### 6.6.4.5. Diseño de vigas (Cubiertas 1 y 2)

Para diseñar las vigas de cubierta se ha elegido al bambú como elemento estructural, configurado por dos culmos el cual será colocado sobre los tableros estructurales (bambú-balsa) y las columnas que intervengan (ver Figura 166)



**Figura 166.** Ubicación de las vigas de cubierta

#### Carga permanente

$$D_c = 115,12 \text{ kg/m}^2$$

#### Carga temporal

$$L_c = 100 \text{ kg/m}^2$$

#### Carga total

$$DL = 115,12 + 100 = 215,12 \text{ kg/m}^2$$

### Proyección de carga DL

$$PDL = DL * \text{COS}(\theta)$$

$$PDL = 215,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(16,70^\circ) \text{ inclinación de cubierta 1}$$

$$PDL = 206,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$PDL = 215,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{COS}(15,64^\circ) \text{ inclinación de cubierta 2}$$

$$PDL = 207,15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

### Proyección de presión del viento

$P_w =$  Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 1)

$$P_{ws} = 6,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$P_w =$  Carga más crítica en barlovento o sotavento (Cubierta 2)

$$P_{wb} = 3,94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Ancho cooperante ( $A_c$ )= 3,05 m.

### CUBIERTA 1

$$W_t = (PDL + P_{ws}) * A_c$$

$$W_t = (206,05 + 6,29) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,05 \text{ m}$$

$$WT1 = 651,01 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

### CUBIERTA 2

$$W_t = (PDL + P_{wb}) * A_c$$

$$W_t = (207,15 + 3,94) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,05 \text{ m}$$

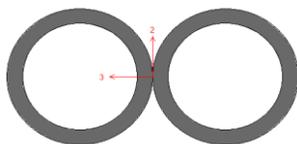
$$WT2 = 643,825 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Considerando que la carga permanente, la carga temporal y la carga viento en sotavento de la cubierta 1 es 1,01 veces mayor que la carga sobre la cubierta 2; entonces es razonable mantener la sección de las vigas para ambos elementos de cubierta.

#### 6.6.4.5.1. Control de diseño

**Paso 1:** Predimensionamiento.

*vigas de 2 culmos*



$$De = 140 \text{ mm}$$

$$e = 15 \text{ mm}$$

$$b = 280 \text{ mm} = 0,28 \text{ m}$$

$$h = 15 \text{ mm} = 0,015 \text{ m}$$

$$A = 1,18 * 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$I_{xx} = 8,11 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$S_{xx} = 5,79 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{espaciamiento} = 3,05 \text{ m}$$

**Peso propio de la viga de bambú**

$$PP. \text{ viga (configuración 2 culmos)} = 13,44 \text{ kg/m}^2$$

$$PP. \text{ viga carga por metro lineal} = 13,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,05 \text{ m}$$

$$PP. \text{ viga carga por metro lineal} = 40,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WT = 651,014 + 40,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WT = 692,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la vigueta (simplemente apoyada, ver Figura 162)

$$\text{Longitud de viga} = 3,60 \text{ m}$$

$$\text{Longitud efectiva} = 3,32 \text{ m}$$

$$MOE_{0,5flex} = 20175,76 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular el  $MOE_{0,5}$  a flexión con el factor de modificación correspondiente  $C_m=0,79$  (C.H.=17%)

$$MOE'_{0,5} = 20175,76 * 0,79 = 15938,85 \text{ MPa}$$

$$MOE'_{0,5} = 1,625 * 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * 692 * 3,32^4}{384 * 1,625 * 10^9 * 8,11 * 10^{-5}}$$

$$\Delta_{max} = 0,00831 \text{ m}$$

**Propósito residencial (baja y media densidad ) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{3,32}{300} = 0,011 \text{ m}$$

$$\Delta_{max} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,00831 \text{ m} \leq 0,011 \text{ m} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 3:** Determinación de momentos y cortantes (ver Figura 163)

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2}$$

$$V_{max} = \frac{692 * 3,32}{2}$$

$$V_{max} = 1148,73 \text{ kgf} = 1,149 \text{ Tnf}$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{692 * 3,32^2}{8}$$

$$M_{max} = 953,44 \text{ kgf} - m = 0,953 \text{ Tnf} - m$$

**Paso 4:** Determinación de esfuerzos admisibles (ver Tabla 93)

**Tabla 93**

*Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen*

Esfuerzos admisibles	$\sigma_{adm-trac}$	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$	$\sigma_{adm-corte}$
	18,91	34,58	31,63	2,38
$C_D$	0,90	0,90	0,90	0,90
$C_m$	1,00	0,79	1,00	1,00
$C_t$	1,00	1,00	1,00	1,00
$C_F$	1,10	1,10	1,10	1,00
$C_L$	1,00	1,00	0,98	1,00
$C_r$	1,10	1,10	1,10	1,10
$C_p$	-	-	-	-
$C_c$	1,00	1,00	1,00	1,00
Esfuerzos admisibles modificados	$\sigma'_{adm-trac}$	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$	$\sigma'_{adm-trac}$
	20,60	29,84	34,56	2,59

**Paso 5:** Momento de inercia necesario por limitación de deflexiones

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I} \leq \frac{L}{K}$$

$$I_{necesario} > \frac{5 * WT * L^3}{384 * MOE}$$

$$I_{necesario} > \frac{5 * 692 * 3,32^3}{384 * 1,625 * 10^9}$$

Quando se utiliza cielo raso o de yeso (K)

$$Carga actuante + sobrecarga = \frac{L}{300}$$

$$K = 300$$

$$I_{necesario} = 6,086 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_{requerido} = 8,107 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$I_{necesario} < I_{requerido}$

$$6,086 * 10^{-5} m^4 < 8,107 * 10^{-5} m^4 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo del módulo de sección

$$Z_{requerido} = \frac{1}{6} * b * h^2$$

$$Z_{requerido} = \frac{1}{6} * 0,28 * 0,14^3$$

$$Z_{requerido} = 9,147 * 10^{-4} m^3 = 914,67 \text{ cm}^3$$

$$Z_{necesario} = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm-flex}}$$

$$Z_{necesario} = \frac{953,44 \text{ kg} - m}{29,84 * 101972 \text{ kg}/m^2}$$

$$Z_{necesario} = 3,13 * 10^{-4} m^3 = 313,30 \text{ cm}^3$$

$Z_{necesario} < Z_{requerido}$

$$313,30 \text{ cm}^3 < 914,67 \text{ cm}^3 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 7:** Análisis de deformaciones diferidas.

Únicamente se utilizará la carga muerta

$$D = 115,12 \frac{kg}{m^2}$$

$$D - \text{Lineal} = 115,12 \frac{kg}{m^2} * 3,05 m = 351,12 \frac{kg}{m}$$

$$D - \text{proyectada} = 336,31 \frac{kg}{m^2}$$

$$WTC - 1.1 = 336,31 \frac{kg}{m^2}$$

**Momento Máximo**

$$M_{max-1.1} = \frac{WTC * L^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = \frac{336,31 * 3,32^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = 463,37 \text{ kgf} - m$$

### **Esfuerzo Máximo**

$$\sigma = \frac{M_{max-1.1}}{Z \text{ requerido}}$$

$$\sigma = \frac{463,37 \text{ kgf} - m}{9,147 * 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 506594,77 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma \leq (0,5 - 0,8) \sigma_{adm-flex}$$

Dependiendo el tipo de material se selecciona el factor sin mayorar el esfuerzo.

$$\sigma \leq (0,6) \sigma_{adm-flex}$$

$$\sigma \leq (0,6) 29,84 * 101972 \text{ kg/m}^2$$

$$506594,77 \text{ kg/m}^2 \leq 1825962,66 \text{ kg/m}^2 \text{ CUMPLE}$$

### **Paso 8:** Verificación del esfuerzo cortante

$$WT * h = 692 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} * 0,14 \text{ m}$$

$$WT * h = 96,88 \text{ kgf}$$

$$WT * h \leq V_{max}$$

$$V_{max} = 1148,73 \text{ kgf}$$

$$96,88 \text{ kgf} \leq 1148,73 \text{ kgf} \text{ CUMPLE}$$

### Análisis del cortante en la sección crítica

$$\tau = \frac{1,5 * (WT * h)}{b * h}$$

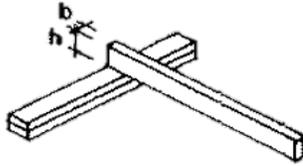
$$\tau = \frac{1,5 * (96,88)}{0,28 * 0,14}$$

$$\tau = 3707,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\tau \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$3707,16 \text{ kg/m}^2 \leq 263809,14 \text{ kg/m}^2 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 9:** Verificación de estabilidad lateral a través de la Figura 164



$$\frac{h}{b} = \frac{0,14}{0,28} = 0,5$$

*Restricción del desplazamiento lateral en apoyos (traslación y rotación)*

**Paso 10:** Verificación de la longitud de apoyo

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$R = V_{m\acute{a}x}$$

$$a = 0,00116423 \text{ m}$$

$$b = 0,28 \text{ m}$$

$$a \leq b$$

$$0,0012 \leq 0,28 \quad \text{CUMPLE}$$

### Conclusión

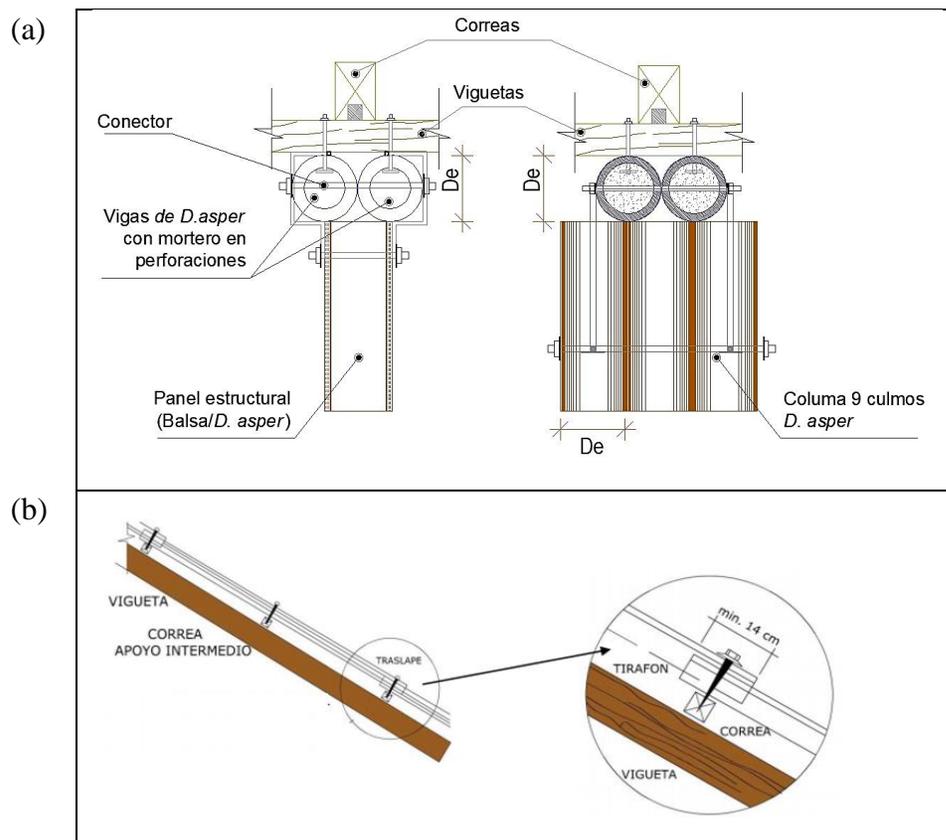
Al observar el módulo de sección requerido y necesario respectivamente se puede concluir que el elemento se encuentra sobredimensionado hasta 4.14 veces; sin embargo los condicionamientos de deflexión y momento de inercia ratifican que se la sección obtenida es la adecuada.

### 6.6.4.6. Resumen de diseño de cubierta

**Tabla 94**

*Resumen de los elementos que conforman la cubierta 1 y 2 de la vivienda N°2*

ELEMENTOS DE CUBIERTA	Tipo	b (cm)	h (cm)	Espaciamiento	Cantidad #
CORREAS Tipo I	Madera Grupo C	4,00	8,00	@1,00 m	13
VIGUETAS Tipo I	Madera Grupo A	16,50	16,50	@1,20 m	12
VIGAS Tipo I	2 culmos de bambú	28,00	14,00	Ejes	7



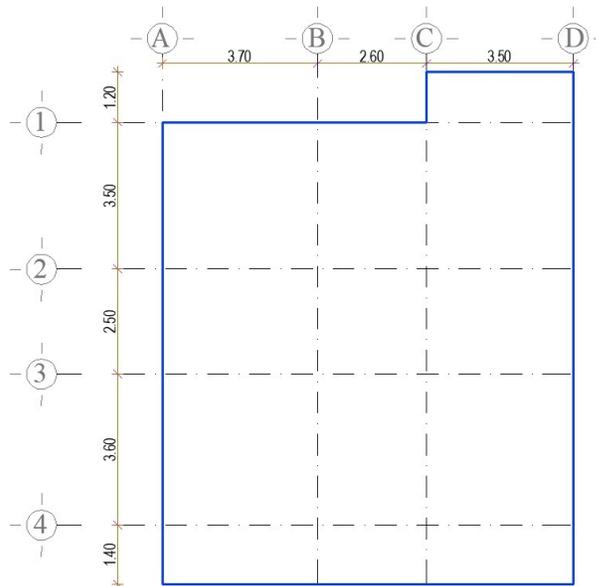
**Figura 167.** Resumen gráfico de los elementos que conforman la cubierta (a) configuración de los tableros estructurales y columnas con las vigas y viguetas, (b) configuración de las vigas con las correas y con la teja

### 6.6.5. Diseño de losa de entrapiso

La vivienda tipo N°2 tendrá una losa maciza de hormigón armado, a continuación se detalla el diseño y armado de este elemento estructural.

#### 6.6.5.1. Predimensionamiento de losa maciza

El primer paso es chequear en qué sentido de armado será diseñada la losa maciza, lo cual le define la geometría en planta de la estructura (a través del panel más grande verificado en los planos arquitectónicos, ver Figura 168).



**Figura 168.** Plano arquitectónico de la losa de entrapiso vivienda N°2

$$\frac{L}{S} \geq 2 \rightarrow \text{Losa unidireccional}$$

$$\frac{L}{S} < 2 \rightarrow \text{Losa bidireccional}$$

L = Lado mayor

S = Lado menor

$$\text{Panel} = 3,70 \text{ m} * 3,60 \text{ m}$$

$$\frac{3,70}{3,60} = 1,028 < 2 \rightarrow \text{Losa bidireccional}$$

Según el **ACI 318-14S Tabla 8.3.1.1** tenemos que para vigas con borde y sin ábacos y un  $f_y = 420 \text{ MPa}$  la altura mínima de una losa bidireccional es:

$$h_{min} = Ln * \frac{(800 + 0,0712fy)}{36000}$$

$h_{min}$ : altura mínima de la losa

$Ln$ : longitud libre (se le resta 0,25 m ya que es la dimensión mínima de una viga).

En este caso la viga de bambú tiene 1 culmo =  $De = 0,14 \text{ m}$

$$h_{min} = (3,70 - 0,14) * \frac{(800 + 0,0712 * 4200)}{36000}$$

$$h_{min} = 0,1129$$

$$h_{min-definitiva} = 12 \text{ cm}$$

#### 6.6.5.2. Análisis de cargas

$$P.p. \text{ Losa} = (1,0 * 1,0 * 0,12) * 2400 \text{ kg/m}^3 = 288 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Acabados} = 100 + 20 + 20 + 5 + 0,12 = 145,12 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Paredes (Paneles tipo sandwich)} = 22,75 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Vigas de bambú} = 18 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Columnas de bambú} = 18 \text{ kg/m}^2$$

#### Carga Permanente (D)

$$D = 491,87 \text{ kg/m}^2$$

#### Carga Temporal (L)

$$L = 200 \text{ kg/m}^2 \text{ Para residencias unifamiliares NEC-SE-CG}$$

#### Carga extra seccionada (+D)

$$\text{Terraza ajardinada} = 236,52 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Carga de servicio} = \mathbf{D+L} = (0,492 + 0,200) T/m^2 = 0,692 T/m^2$$

$$\text{Carga última} = \mathbf{Wu} = 1,2D+1,6L = (1,2 * 0,692 + 1,6 * 0,200) T/m^2$$

$$\mathbf{Wu} = 1,151 T/m^2$$

$$\text{Carga extra última} = (1,2 * (0,692 + 0,23652) + 1,6 * 0,200) T/m^2$$

$$\mathbf{W_{+D}} = 1,434 T/m^2$$

Para el diseño de losa bidireccional se utilizara el **Método de los coeficientes** - Método 3, a través de la tabla fracción de la carga  $W$  en las direcciones de A y B para fuerza secante en la losa y carga sobre apoyos.

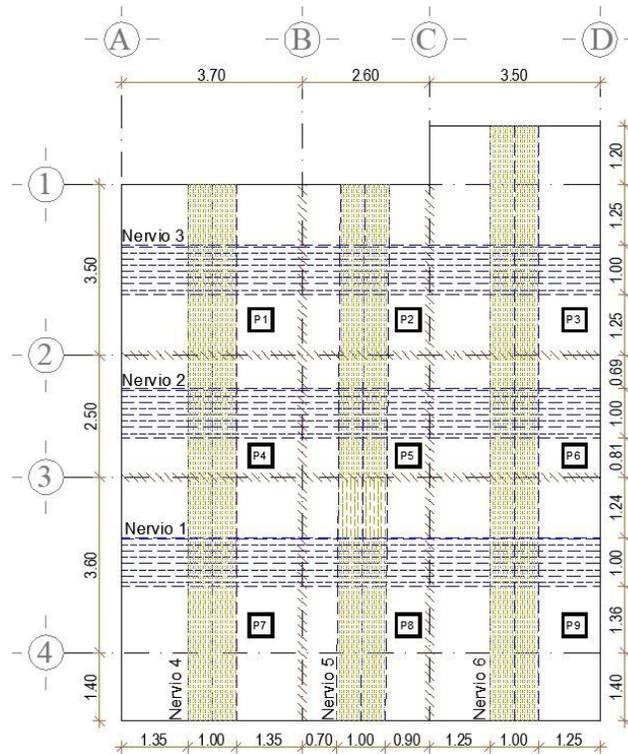
- Se divide la losa en paneles según el Método 3 y se enumeran los nervios a diseñar, los cuales están evaluados en 1,00 m de losa. (ver Figura 169).
- Se distribuye la carga según el tipo de panel y la fracción de la carga (ver Tabla 95).
- Los coeficientes son ubicados en cada panel de división que permitirán obtener la carga que produce en su sentido corto o largo (ver Figura 170).

**Tabla 95**

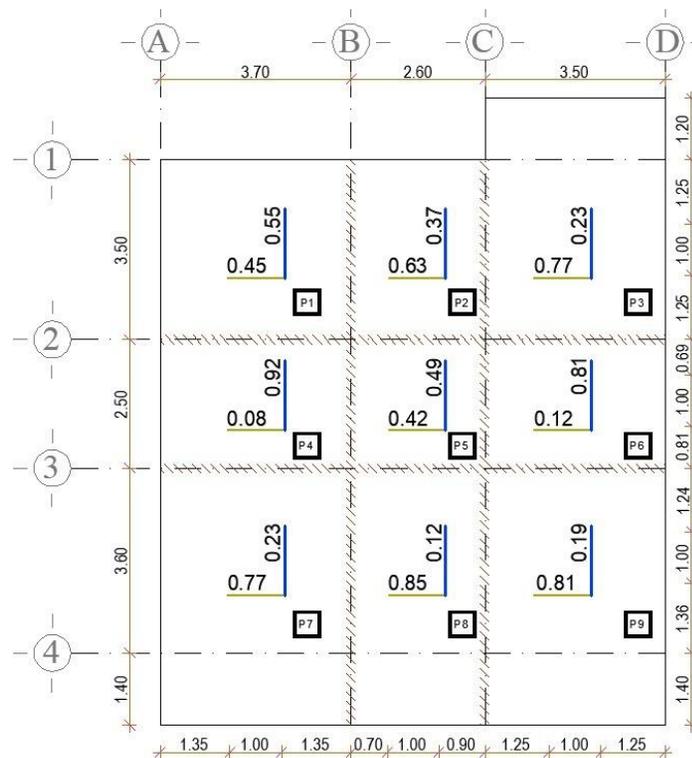
*Tabla de Fracción de carga*

Panel	m = A/B	Caso	W <sub>A</sub>	W <sub>B</sub>
<b>P1</b>	0,95	4	0,550	0,450
<b>P2</b>	0,74	8	0,634	0,366
<b>P3</b>	0,74	4	0,77	0,23
<b>P4</b>	0,68	9	0,92	0,08
<b>P5</b>	0,96	2	0,490	0,418
<b>P6</b>	0,71	9	0,804	0,116
<b>P7</b>	0,74	4	0,77	0,23
<b>P8</b>	0,52	8	0,874	0,116
<b>P9</b>	0,7	4	0,81	0,19

\*A es la luz corta y B luz larga.



**Figura 169.** Losa de entrepiso dividida en paneles y numerada por nervios



**Figura 170.** Coeficientes en el sentido mayor y menor de cada panel de la losa

### 6.6.5.3. Chequeo cortante

$$Vu \leq \phi Vn$$

$$Vu = 1,15 * \frac{Wu * Ln}{2} \text{ (vanos centrales)}$$

$$Vu = Wu * Ln \text{ (vanos en voladizo)}$$

$$\phi = 0,75$$

$Ln$  = Luz libre – los extremos de columnas

$b$  = nervio de losa 1,00 m

$$Vc = 0,53 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$$Vc = 0,53 * \sqrt{210} * 100 * 12$$

$$Vc = 9216,52 \text{ kg}$$

#### Carga de losa general

Panel P4 (0,92  $Wu$ )

$$Vu = 1,15 * \frac{(1,151 * 0,92) \text{ Tn/ml} * (2,50 - 0,42)\text{m}}{2}$$

$$Vu = 1,267 \text{ Tn} = 1267 \text{ kg}$$

$$\therefore 1267 \text{ kg} \leq 0,75 * 9216,52$$

$$\therefore 1267 \text{ kg} \leq 6912,39 \text{ kg} \text{ CUMPLE}$$

#### Carga de losa general en voladizo

$$Vu = 1,151 \frac{T}{m^2} * 1 \text{ ml} * (1,40) \text{ m}$$

$$Vu = 1,6114 \text{ Tn} = 1611,4 \text{ kg}$$

$$\therefore 1611,4 \text{ kg} \leq 0,75 * 9216,52$$

$$\therefore 1611,4 \text{ kg} \leq 6912,39 \text{ kg} \text{ CUMPLE}$$

#### Carga de losa + zona ajardinada

Panel P4 (0,77  $W_{+D}$ )

$$Vu = 1,15 * \frac{(1,434 * 0,77) \text{ Tn/ml} * (3,70 - 0,42)\text{m}}{2}$$

$$Vu = 2,082 \text{ Tn} = 2082 \text{ kg}$$

$$\therefore 2082 \text{ kg} \leq 0,75 * 9216,52$$

$$\therefore 2082 \text{ kg} \leq 6912,39 \text{ kg} \quad \text{CUMPLE}$$

#### **Carga de losa + zona ajardinada en voladizo**

$$Vu = 1,434 \frac{T}{m^2} * 1 \text{ ml} * (1,40) \text{ m}$$

$$Vu = 2,007 \text{ Tn} = 2007 \text{ kg}$$

$$\therefore 2007 \text{ kg} \leq 0,75 * 9216,52$$

$$\therefore 2007 \text{ kg} \leq 6912,39 \text{ kg} \quad \text{CUMPLE}$$

#### **6.6.5.4. Análisis de nervios**

A través de los modelos matemáticos desarrollados por los nervios propuestos con su respectiva carga, se procede a evaluar los momentos (**ACI 318-14S Tabla 6.5.2**), cuantía mínima y armadura de diseño de cada tramo de losa en ambas direcciones de análisis. Las Tablas 96, 97, 98, 99, 100 y 101 presentan el desarrollo de cálculo completo para el diseño de la losa.

#### **Cuantía de acero**

$$\rho = 0,85 * \frac{f'c}{fy} * \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2 * Mu}{\phi * 0,85 * f'c * b * d^2} \right) \right]^{1/2}$$

#### **Cuantía mínima**

$$\rho \geq \frac{14}{fy} = 0,0033$$

#### **Espaciamiento máximo (ACI 318-14S sección 8.7.2.2)**

$$s \leq 2 * h; 45 \text{ cm (secciones críticas)}$$

$$s \leq 2 * 12 \text{ cm}; 45 \text{ cm}$$

$$\therefore s \leq 24 \text{ cm}; 45 \text{ cm}$$

$$s \leq 3 * 12 \text{ cm}; 45 \text{ cm (otras secciones)}$$

$$\therefore s \leq 36 \text{ cm}; 45 \text{ cm}$$







### 6.6.5.5. Refuerzo de temperatura y retracción de fraguado

$$A_s = 0,0018 * b * h$$

$$A_s = 0,0018 * 100 * 12$$

$$A_s = 2,16 \text{ cm}^2$$

$$s \leq 5 * h; 45 \text{ cm}$$

$$s \leq 5 * 12 \text{ cm}; 45 \text{ cm}$$

$$s \leq 60 \text{ cm}; 45 \text{ cm}$$

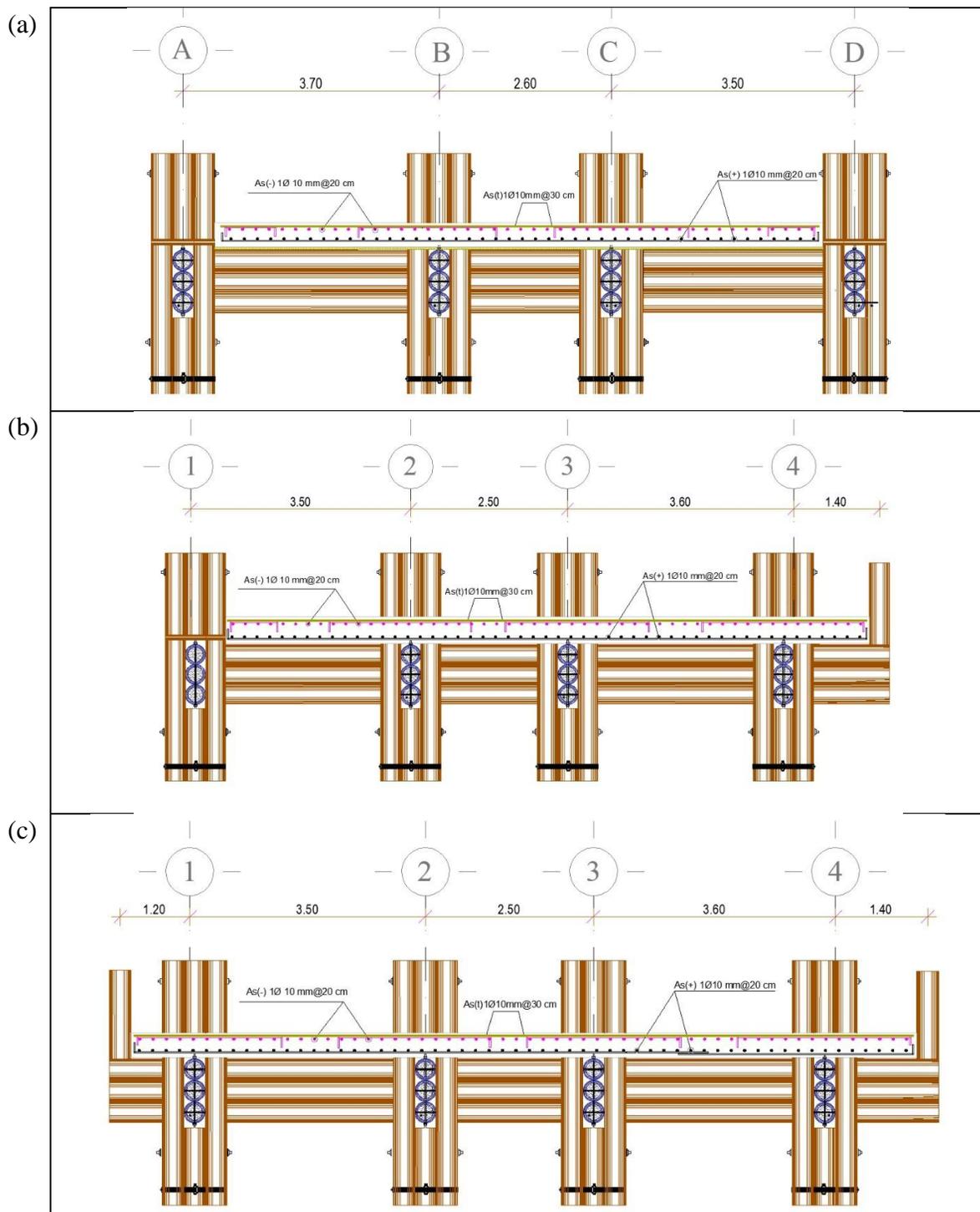
$$1\phi 10\text{mm}@30\text{cm}$$

### 6.6.5.6. Resumen de diseño de losa de entrepiso

**Tabla 102**

*Armado de la losa de entrepiso en función de los momentos positivos y negativos*

Nervio		Armadura - $A_s$ (cm <sup>2</sup> )						
EJES		A	A-B	B	B-C	C	C-D	D
1	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						
2	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						
3	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						
EJES		1	1-2	2	2-3	3	3-4	4
4	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						
5	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						
6	Mu (-)	1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm		1 $\phi$ 10mm @20cm
	Mu (+)	1 $\phi$ 10mm@20cm						

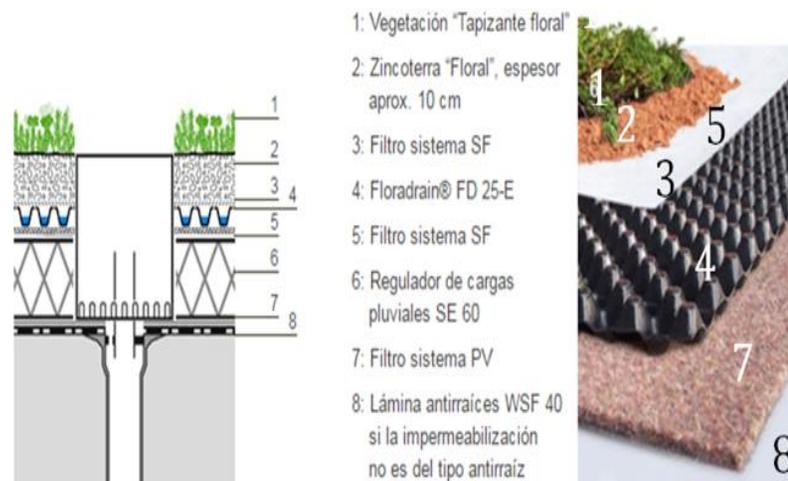


**Figura 171.** Detalle de la losa de entpiso, corte longitudinal del (a) nervio 1-2-3 (b) nervio 4-5 y (c) nervio 6

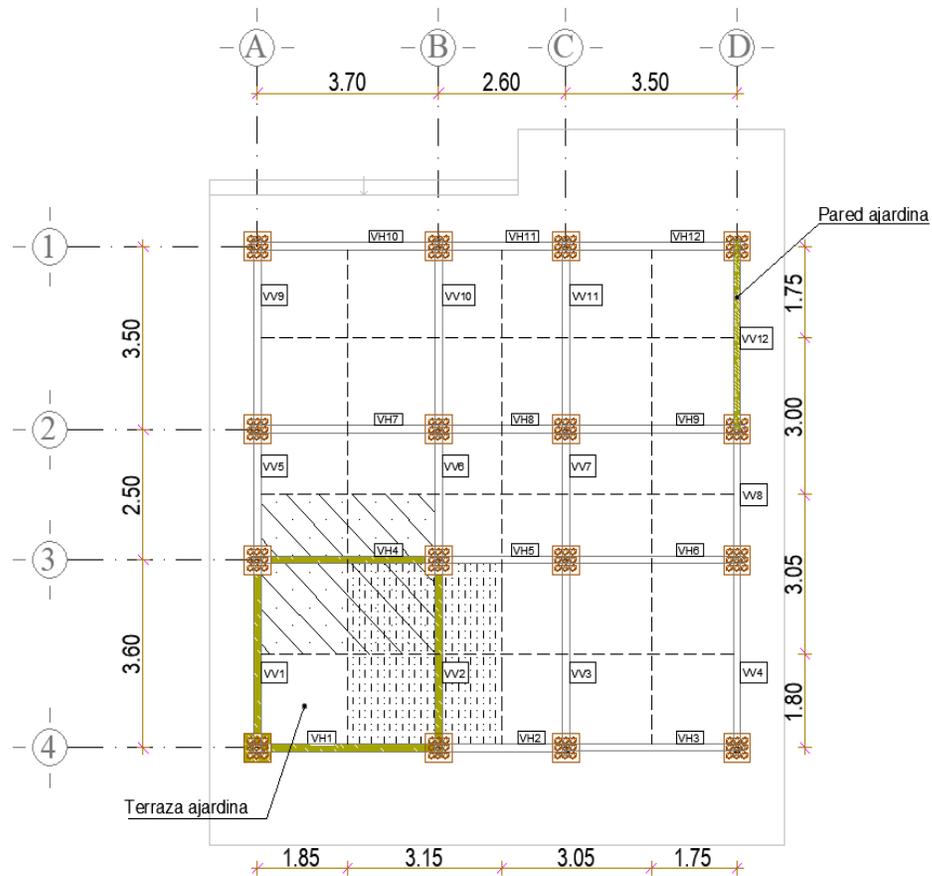
## 6.6.6. Diseño de vigas de entrepiso

### 6.6.6.1. Elementos de entrepiso

Las vigas de entrepiso soportarán estructuralmente el peso que genera la losa de hormigón maciza (espesor=12cm), las instalaciones de iluminación, aislante térmico, paredes (en este caso se adecuarán tableros estructurales tipo sándwich de bambú-balsa con espesores distintos para fachadas e interiores), acabados y carga temporal de residencias (NEC-SE-CG, 2015). Cabe recalcar que esta vivienda posee una particularidad en la planta alta, su terraza ajardinada (área de 13,32 m<sup>2</sup>), ésta genera un peso relativamente crítico por la tierra saturada y los demás productos conformantes de la estructura ajardinada (ver Figura 172). Teniendo en consideración estas acotaciones, se inicia con el diseño de las vigas de entrepiso (ver Figura 173) que permitan una funcionalidad óptima en la estructura como también en la técnica constructiva in situ.



**Figura 172.** Elementos de la terraza ajardinada



**Figura 173.** Vista en planta de las vigas de entepiso de la vivienda N°2

#### 6.6.6.2. Análisis de cargas

##### Cargas de entepiso

- Losa maciza de hormigón ( $210 \text{ kg/cm}^2$ )  $12\text{cm} = 288 \text{ kg/m}^2$
- Malla Amex R131 ( $6250 \times 2400 \times 3,5$ )mm =  $1,01 \text{ kg/m}^2$
- Lámina impermeabilizante Techofielt 2000 para pisos =  $2,60 \text{ kg/m}^2$
- Esterilla de bambú (Caña chancada) =  $20,00 \text{ kg/m}^2$
- Instalaciones y accesorios =  $2,00 \text{ kg/m}^2$
- Instalaciones de iluminación =  $5,00 \text{ kg/m}^2$
- Pintura interior blanca =  $0,09 \text{ kg/m}^2$

- Productos estéticos (resinas o aceites) = 0,12 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 318,82 kg/m<sup>2</sup>**

#### **Peso propio de la viga estructural de bambú**

- Ppviga: 6,76 kg/m<sup>2</sup>

#### **Cargas de entepiso adicional por terraza ajardinada**

- Zincoterra "flora-saturada" 100 mm = 225,00 kg/m<sup>2</sup>
- Filtro sistema SF (x2) 0,60 mm = 0,10 kg/m<sup>2</sup>
- Floradrain FD25-E 25 mm = 1,60 kg/m<sup>2</sup>
- Regulador de cargas pluviales SE 60-E forotherm 0,60 mm = 1,10 kg/m<sup>2</sup>
- Filtro sistema PV 65 mm = 0,30 kg/m<sup>2</sup>
- Lámina antirraíces WSF 40 - 0,60 mm = 0,32 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones 0,34 mm = 0,80 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 236,52 kg/m<sup>2</sup>**

#### **Cargas de paredes exteriores**

- Paneles tipo sándwich para exteriores (1200x600x125) mm = 51,46 kg/m<sup>2</sup>
- Pintura exterior blanca = 0,10 kg/m<sup>2</sup>
- Pintura interior blanca = 0,09 kg/m<sup>2</sup>
- Productos estéticos (resinas o aceites) = 0,12 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones de iluminación = 5,00 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 56,77 kg/m<sup>2</sup>**

#### **Cargas de paredes interiores**

- Paneles tipo sándwich para interiores (1200x600x74)mm = 22,75 kg/m<sup>2</sup>
- Pintura exterior blanca = 0,10 kg/m<sup>2</sup>

- Pintura interior blanca= 0,09 kg/m<sup>2</sup>
- Productos estéticos (resinas o aceites) = 0,12 kg/m<sup>2</sup>
- Instalaciones de iluminación = 5,00 kg/m<sup>2</sup>

**Total = 28,06 kg/m<sup>2</sup>**

### 6.6.6.3. Configuración de las vigas de entrepiso

Para elegir los tipos de vigas de entrepiso, fue necesario asumir las siguientes consideraciones:

- La clasificación preliminar (ver Tabla 103 y 104) fue basada en las dirección en planta “X” o “Y” en la que estaban ubicadas, logrando una nomenclatura que permita diferenciar si se encuentran en sentido vertical u horizontal (VV=viga vertical, VH=viga horizontal) tal como se mostró en la Figura 172.
- A partir de esto, se procedió a clasificar las vigas que soportarían el entrepiso común frente a las que son cargadas adicionalmente por la terraza ajardinada.

**Tabla 103**

*Dimensiones de vigas en sentido horizontal con áreas cooperantes*

<b>VIGAS</b>	<b>Ancho cooperante (m)</b>	<b>Luz de viga (m)</b>	<b>Área cargada (m<sup>2</sup>)</b>
VH1	1,80	3,70	6,66
VH2	1,80	2,60	4,68
VH3	1,80	3,50	6,30
VH4	3,05	3,70	11,29
VH5	3,05	2,60	7,93
VH6	3,05	3,50	10,68
VH7	3,00	3,70	11,10
VH8	3,00	2,60	7,80
VH9	3,00	3,50	10,50
VH10	1,75	3,70	6,48
VH11	1,75	2,60	4,55
VH12	1,75	3,50	6,13
<b>VIGAS CRÍTICAS PARA DISEÑO</b>			
Viga con carga entrepiso + terraza ajardinada		<b>VH4</b>	11,29
Viga con carga entrepiso		<b>VH7</b>	11,10

**Tabla 104***Dimensiones de vigas en sentido vertical con áreas cooperantes*

<b>VIGAS</b>	<b>Ancho cooperante (m)</b>	<b>Luz de viga (m)</b>	<b>Área cargada (m<sup>2</sup>)</b>
VV1	3,60	1,85	6,66
VV2	3,60	3,15	11,34
VV3	3,60	3,05	10,98
VV4	3,60	1,75	6,30
VV5	2,50	1,85	4,63
VV6	2,50	3,15	7,88
VV7	2,50	3,05	7,63
VV8	2,50	1,75	4,38
VV9	3,50	1,85	6,48
VV10	3,50	3,15	11,03
VV11	3,50	3,05	10,68
VV12	3,50	1,75	6,13
<b>VIGAS CRÍTICAS PARA DISEÑO</b>			
Viga con carga entrepiso + terraza ajardinada		<b>VV2</b>	11,34
Viga con carga entrepiso		<b>VV10</b>	11,03

Analizando dichos parámetros, para el diseño de las vigas de entrepiso de la vivienda N°2 se optó por tomar las vigas más críticas en función de la carga que soporta, independientemente de su ubicación vertical u horizontal, ya que a pesar de tener vigas con diferente longitud, constructivamente no sería viable cambiar su configuración en áreas relativamente similares; por otro lado, a nivel de rigidez y funcionalidad de la estructura completa representa un factor crítico cambiar la sección de las vigas, ya que aportan a que el comportamiento de la vivienda no genere torsión en los modos de vibración fundamentales.

Entonces, se procede a diseñar una viga de entrepiso común tomando una configuración inicial de 2 culmos.

### **Carga permanente**

$$D = 375,59 \text{ kg/m}^2$$

**Carga temporal**

$$L = 200 \text{ kg/m}^2$$

**Carga acabados**

$$Ac = 100 \text{ kg/m}^2$$

**Carga total**

$$DLAc = 207,59 + 200 + 100 = 675,59 \text{ kg/m}^2$$

**6.6.6.4. Control de diseño**

*Paso 1:* Predimensionamiento de la viga

*Configuración de viga = 2 culmos*

$$De = 140 \text{ mm}$$

$$t = 15 \text{ mm}$$

$$b = 140 \text{ mm} = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 280 \text{ mm} = 0,28 \text{ m}$$

$$Area = 1,18 * 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$I_{yy} = 8,11 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$S_{yy} = 5,79 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$Peso \text{ propio viga} = 13,52 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = DLAc + PPviga \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 675,59 + 13,52 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 689,11 \text{ kg/m}^2$$

$$Ancho \text{ cooperante} = 3,15 \text{ m}$$

$$WT = WP * Ancho \text{ cooperante} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WT = 689,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,15 \text{ m}$$

$$WT = 2170,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la viga (simplemente apoyada, ver Figura 162)

$$\text{Longitud de viga} = 3,50 \text{ m}$$

$$\text{Longitud efectiva} = 3,22 \text{ m}$$

$$\text{MOE}_{0,5\text{flex}} = 20175,76 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular el  $\text{MOE}_{0,5}$  a flexión con el factor de modificación correspondiente  $C_m=0,79$  (C.H.=17%)

$$\text{MOE}'_{0,5} = 20175,76 * 0,79 = 15938,85 \text{ MPa}$$

$$\text{MOE}'_{0,5} = 1,625 * 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$I = 8,11 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * \text{MOE} * I}$$

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{5 * 20175,76 * 3,22^4}{384 * 1,625 * 10^9 * 8,11 * 10^{-5}}$$

$$\Delta_{\text{max}} = 0,020 \text{ m}$$

**Propósito residencial (baja y media densidad ) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{3,22}{300} = 0,011 \text{ m}$$

$$\Delta_{\text{max}} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,020 \text{ m} \leq 0,011 \text{ m} \text{ **NO CUMPLE**}$$

La viga para entrepiso común no cumplió con el primer chequeo por tanto, se procede a aumentar de sección a una configuración de 3 culmos y volver a analizar.

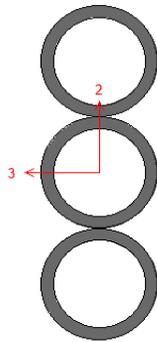
### VIGA VV10 (Crítica con carga de entrepiso común)

**Paso 1:** Predimensionamiento de la viga

#### Carga total

$$DLAc = 375,59 + 200 + 100 = 675,59 \text{ kg/m}^2$$

**configuración de viga = 3 culmos**



$$De = 140 \text{ mm}$$

$$t = 15 \text{ mm}$$

$$b = 140 \text{ mm} = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 420 \text{ mm} = 0,42 \text{ m}$$

$$Area = 1,77 * 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$I_{yy} = 2,66 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$S_{yy} = 1,27 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Peso \text{ propio viga} = 20,28 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = DLAc + PPviga \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 675,59 + 20,28 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 695,87 \text{ kg/m}^2$$

$$Ancho \text{ cooperante} = 3,15 \text{ m}$$

$$WT = WP * Ancho cooperante \frac{kg}{m}$$

$$WT = 695,87 \frac{kg}{m^2} * 3,15 m$$

$$WT = 2191,98 \frac{kg}{m}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la viga (simplemente apoyada, ver Figura 162)

$$Longitud de viga = 3,50 m$$

$$Longitud efectiva = 3,22 m$$

$$MOE_{0.5} = 20175,76 MPa$$

Se procede a calcular el  $MOE_{0.5}$  a flexión con el factor de modificación correspondiente  $C_m=0,79$  (C.H.=17%)

$$MOE'_{0.5} = 20175,76 * 0,79 = 15938,85 MPa$$

$$MOE'_{0.5} = 1,625 * 10^9 \frac{kg}{m^2}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * 2191,98 * 3,22^4}{384 * 1,625 * 10^9 * 2,66 * 10^{-4}}$$

$$\Delta_{max} = 0,007 m$$

**Propósito residencial (baja y media densidad ) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{3,22}{300} = 0,011 m$$

$$\Delta_{max} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,007 m \leq 0,011 m \text{ CUMPLE}$$

**Paso 3:** Determinación de momentos y cortantes (ver Figura 163)

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2}$$

$$V_{max} = \frac{2191,98 * 3,22}{2}$$

$$V_{max} = 3529,09 \text{ kgf} = 3,529 \text{ Tnf}$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{12191,98 * 3,22^2}{8}$$

$$M_{max} = 2840,92 \text{ kgf} - m = 2,841 \text{ Tnf} - m$$

**Paso 4:** Determinación de esfuerzos admisibles modificados (ver Tabla 105).

**Tabla 105**

*Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen*

<b>Esfuerzos admisibles</b>	$\sigma_{adm-trac}$	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$	$\sigma_{adm-corte}$
	18,91	34,58	31,63	2,38
C <sub>D</sub>	0,90	0,90	0,90	0,90
C <sub>m</sub>	1,00	0,79	1,00	1,00
C <sub>t</sub>	1,00	1,00	1,00	1,00
C <sub>F</sub>	1,10	1,10	1,10	1,00
C <sub>L</sub>	0,98	0,98	0,98	0,98
C <sub>r</sub>	1,10	1,10	1,10	1,10
C <sub>p</sub>	-	-	-	-
C <sub>c</sub>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Esfuerzos admisibles modificados</b>	$\sigma'_{adm-trac}$	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$	$\sigma'_{adm-trac}$
	20,18	29,25	33,87	2,54

**Paso 5:** Momento de inercia necesario por limitación de deflexiones

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I} \leq \frac{L}{K}$$

$$I_{necesario} > \frac{K * 5 * WT * L^3}{384 * MOE}$$

$$MOE'_{0.5} = 1,625 * 10^9 \frac{kg}{m^2}$$

**Cuando se utiliza cielo raso o de yeso (K)**

$$Carga\ actuante + sobrecarga = \frac{L}{300}$$

$$K = 300$$

$$I\ necesario > \frac{300 * 5 * 2191,98 * 3,22^3}{384 * 1,625 * 10^9}$$

$$I\ necesario = 1,759 * 10^{-4} m^4$$

$$I\ requerido = 2,659 * 10^{-4} m^4$$

$$I\ necesario < I\ requerido$$

$$1,759 * 10^{-4} m^4 < 2,659 * 10^{-4} m^4 \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 6:** Chequeo del módulo de sección

$$Z\ requerido = \frac{1}{6} * b * h^3$$

$$Z\ requerido = \frac{1}{6} * 0,14 * 0,42^3$$

$$Z\ requerido = 4,116 * 10^{-3} m^3 = 4116,00 cm^3$$

$$Z\ necesario = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm-flex}}$$

$$Z\ necesario = \frac{2840,92\ kgf - m}{29,25 * 101972\ kg/m^2}$$

$$Z\ necesario = 9,526 * 10^{-4} m^3 = 952,56 cm^3$$

$$Z\ necesario < Z\ requerido$$

$$952,56 cm^3 < 4116,00 cm^3 \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 7:** Análisis de deformaciones diferidas.

Únicamente se utilizará la carga muerta

$$D + Ac = 375,59 + 100 \frac{kg}{m^2}$$

$$D - lineal = 375,59 \frac{kg}{m^2} * 3,15 m = 1498,10 \frac{kg}{m}$$

$$WTC - 1.1 = 1498,10 \frac{kg}{m}$$

### **Momento Máximo**

$$M_{max-1.1} = \frac{WTC * L^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = \frac{1498,10 * 3,22^2}{8}$$

$$M_{max-1.1} = 1941,61 \text{ kgf} - m$$

### **Esfuerzo Máximo**

$$\sigma = \frac{M_{max-1.1}}{Z \text{ requerido}}$$

$$\sigma = \frac{1941,61 \text{ kgf} - m}{4,116 * 10^{-3} m^3}$$

$$\sigma = 471722,90 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma \leq (0,5 - 0,8) \sigma_{adm-flex}$$

Dependiendo el tipo de material se selecciona el factor sin mayorar el esfuerzo.

$$\sigma \leq (0,6) \sigma_{adm-flex}$$

$$\sigma \leq (0,6) 0,6 * 1,625 * 10^9 \text{ kg/m}^2$$

$$471722,90 \text{ kg/m}^2 \leq 1789443,406 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 8:** Verificación del esfuerzo cortante

$$WT * h = 2191,98 \frac{kgf}{m^2} * 0,42 m$$

$$WT * h = 920,63 \text{ kgf}$$

$$WT * h \leq V_{max}$$

$$V_{max} = 3529,09 \text{ kgf}$$

$$920,63 \text{ kgf} \leq 3529,09 \text{ kgf} \quad \text{CUMPLE}$$

Análisis del cortante en la sección crítica

$$\tau = \frac{1,5 * (WT * h)}{b * h}$$

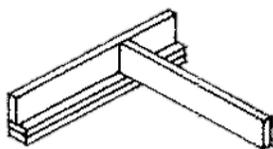
$$\tau = \frac{1,5 * (920,63)}{0,14 * 0,42}$$

$$\tau = 23485,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\tau \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$23485,51 \text{ kg/m}^2 \leq 258532,96 \text{ kg/m}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 9:** Verificación de estabilidad lateral a través de la Figura 164



$$\frac{h}{b} = \frac{0,42}{0,14} = 3$$

*Restricción del desplazamiento lateral en apoyos, (traslación y rotación).*

**Paso 10:** Verificación de la longitud de apoyo

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$R = V_{m\acute{a}x}$$

$$a = 0,00729 \text{ m}$$

$$b = 0,140 \text{ m}$$

$$a \leq b$$

$$0,00729 \leq 0,140 \quad \text{CUMPLE}$$

### **Conclusión**

Al observar la inercia y el módulo de sección (requerido y necesario), se puede concluir que el elemento se encuentra sobredimensionado en 1,50 y 4,30 veces, respectivamente; sin embargo, los condicionamientos de deflexión y momento de inercia ratifican que la configuración de 3 culmos obtenida es la adecuada.

### **VIGA VV2 (Crítica con carga de entrepiso común + terraza ajardinada)**

*Paso I:* Predimensionamiento de la viga

#### **Carga total**

$$DLAc = 812,11 \text{ kg/m}^2$$

#### **configuración de viga = 3 culmos**

$$De = 140 \text{ mm}$$

$$t = 15 \text{ mm}$$

$$b = 140 \text{ mm} = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 420 \text{ mm} = 0,42 \text{ m}$$

$$Area = 1,77 * 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$I_{yy} = 2,66 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$S_{yy} = 1,27 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Peso \text{ propio viga} = 20,28 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = DLAc + PPviga \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 812,11 + 20,28 \text{ kg/m}^2$$

$$WP = 832,39 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Ancho cooperante} = 3,15 \text{ m}$$

$$WT = WP * \text{Ancho cooperante} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WT = 832,39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,15 \text{ m}$$

$$WT = 2622,02 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**Paso 2:** Chequeo de la deflexión sobre la viga (simplemente apoyada, ver Figura 162)

$$\text{Longitud de viga} = 3,60 \text{ m}$$

$$\text{Longitud efectiva} = 3,32 \text{ m}$$

$$MOE'_{0.5} = 1,625 * 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 * 2622,02 * 3,32^4}{384 * 1,625 * 10^9 * 2,66 * 10^{-4}}$$

$$\Delta_{max} = 0,010 \text{ m}$$

**Propósito residencial (baja y media densidad ) NSR (2010)**

$$\Delta_{ps} = \frac{L}{300}$$

$$\Delta_{ps} = \frac{3,32}{300} = 0,011 \text{ m}$$

$$\Delta_{max} \leq \Delta_{ps}$$

$$\therefore 0,010 \text{ m} \leq 0,011 \text{ m} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 3:** Determinación de momentos y cortantes (ver Figura 163)

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2}$$

$$V_{max} = \frac{2622,02 * 3,32}{2}$$

$$V_{max} = 4352,55 \text{ kgf} = 4,352 \text{ Tnf}$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{2622,02 * 3,32^2}{8}$$

$$M_{max} = 3612,62 \text{ kgf} - m = 3,613 \text{ Tnf} - m$$

**Paso 4:** Determinación de esfuerzos admisibles modificados (ver Tabla 105).

**Paso 5:** Momento de inercia necesario por limitación de deflexiones

$$\Delta_{max} = \frac{5 * WT * L^4}{384 * MOE * I} \leq \frac{L}{K}$$

$$I_{necesario} > \frac{K * 5 * WT * L^3}{384 * MOE}$$

$$MOE'_{0.5} = 1,625 * 10^9 \frac{kg}{m^2}$$

Cuando se utiliza cielo raso o de yeso (K)

$$Carga actuante + sobrecarga = \frac{L}{300}$$

$$K = 300$$

$$I_{necesario} > \frac{300 * 5 * 2622,02 * 3,32^3}{384 * 1,625 * 10^9}$$

$$I_{necesario} = 2,306 * 10^{-4} m^4$$

$$I_{requerido} = 2,659 * 10^{-4} m^4$$

$$I_{necesario} < I_{requerido}$$

$$2,306 * 10^{-4} m^4 < 2,659 * 10^{-4} m^4 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo del módulo de sección

$$Z_{requerido} = \frac{1}{6} * b * h^3$$

$$Z \text{ requerido} = \frac{1}{6} * 0,14 * 0,42^3$$

$$Z \text{ requerido} = 4,116 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 4116,00 \text{ cm}^3$$

$$Z \text{ necesario} = \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm-flex}}}$$

$$Z \text{ necesario} = \frac{3612,62 \text{ kgf} - \text{m}}{29,25 * 101972 \text{ kg/m}^2}$$

$$Z \text{ necesario} = 1,211 * 10^{-4} \text{ m}^3 = 1211,31 \text{ cm}^3$$

$$Z \text{ necesario} < Z \text{ requerido}$$

$$1211,31 \text{ cm}^3 < 4116,00 \text{ cm}^3 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 7:** Análisis de deformaciones diferidas.

Únicamente se utilizará la carga muerta

$$D + Ac = 612,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$D - \text{lineal} = 612,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 3,15 \text{ m} = 1928,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WTC - 1.1 = 1928,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

**Momento Máximo**

$$M_{\max-1.1} = \frac{WTC * L^2}{2}$$

$$M_{\max-1.1} = \frac{1928,14 * 3,32^2}{8}$$

$$M_{\max-1.1} = 2656,59 \text{ kgf} - \text{m}$$

**Esfuerzo Máximo**

$$\sigma = \frac{M_{\max-1.1}}{Z \text{ requerido}}$$

$$\sigma = \frac{2656,59 \text{ kgf} \cdot \text{m}}{4,116 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 645429,40 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma \leq (0,5 - 0,8) \sigma_{adm-flex}$$

Dependiendo el tipo de material se selecciona el factor sin mayorar el esfuerzo.

$$\sigma \leq (0,6) \sigma_{adm-flex}$$

$$\sigma \leq (0,6) 29,25 \cdot 101972 \text{ kg/m}^2$$

$$645429,40 \text{ kg/m}^2 \leq 1789443,41 \text{ kg/m}^2 \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 8:** Verificación del esfuerzo cortante

$$WT \cdot h = 2622,02 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \cdot 0,42 \text{ m}$$

$$WT \cdot h = 1101,25 \text{ kgf}$$

$$WT \cdot h \leq V_{max}$$

$$V_{max} = 4352,55 \text{ kgf}$$

$$1101,25 \text{ kgf} \leq 4352,55 \text{ kgf} \text{ **CUMPLE**}$$

Análisis del cortante en la sección crítica

$$\tau = \frac{1,5 \cdot (WT \cdot h)}{b \cdot h}$$

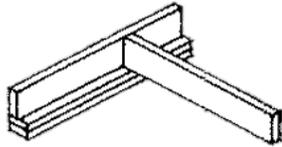
$$\tau = \frac{1,5 \cdot (1101,25 \text{ kgf})}{0,14 \cdot 0,42}$$

$$\tau = 28093,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\tau \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$28093,06 \text{ kg/m}^2 \leq 258532,96 \text{ kg/m}^2 \text{ **CUMPLE**}$$

**Paso 9:** Verificación de estabilidad lateral a través de la Figura 164



$$\frac{h}{b} = \frac{0,42}{0,14} = 3$$

*Restricción del desplazamiento lateral en apoyos, (traslación y rotación).*

**Paso 10:** Verificación de la longitud de apoyo

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$R = V_{m\acute{a}x}$$

$$a = 0,009 \text{ m}$$

$$b = 0,140 \text{ m}$$

$$a \leq b$$

$$0,009 \leq 0,140 \quad \text{CUMPLE}$$

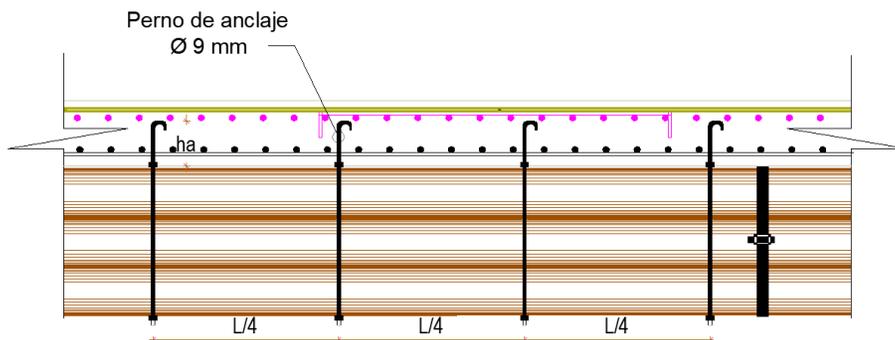
### Conclusión

Se puede concluir que la configuración tomada es la adecuada ya que cumple con todos los chequeos de diseño, siendo la viga de entrepiso ajardinada la más cargada de la estructura.

#### 6.6.6.5. Conectores de corte de la viga de entrepiso con la losa de hormigón

Para que exista un comportamiento conjunto entre las vigas de entrepiso y la losa de hormigón será necesario implementar conectores de corte que vinculen ambos materiales y trabajen como una unidad para reducir las deformaciones causadas por las

cargas que incurren en estos elementos estructurales y transferir cada uno de sus esfuerzos (ver Figura 174).



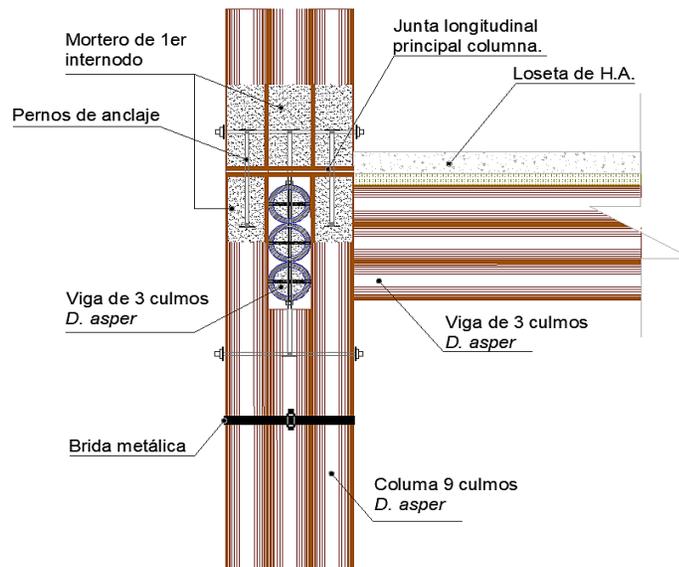
**Figura 174.** Detalle del conector de corte de la viga de entrepiso con la losa de hormigón

#### 6.6.6.6. Resumen de las vigas de entrepiso

**Tabla 106**

*Resumen del tipo de viga de entrepiso y su configuración estructural para la vivienda N°2*

<b>CONFIGURACIÓN PARA TODAS LAS VIGAS DE ENTREPISO DE LA VIVIENDA N°2</b>  <b>Total: 24</b>	<b>N° de Culmos:</b> 3	
	<b>Base (b):</b> 140 mm	
	<b>Altura (h):</b> 420 mm	
	<b>Área:</b> 17671,46 mm <sup>2</sup>	
	<b>Inercia Ixx:</b> 35011577,40 mm <sup>4</sup>	
	<b>Inercia Iyy:</b> 265918637,5 mm <sup>4</sup>	
	<b>Carga máxima soportada:</b> 7,534 Tn	
	<b>Longitud libre:</b> Planos arquitectónicos	



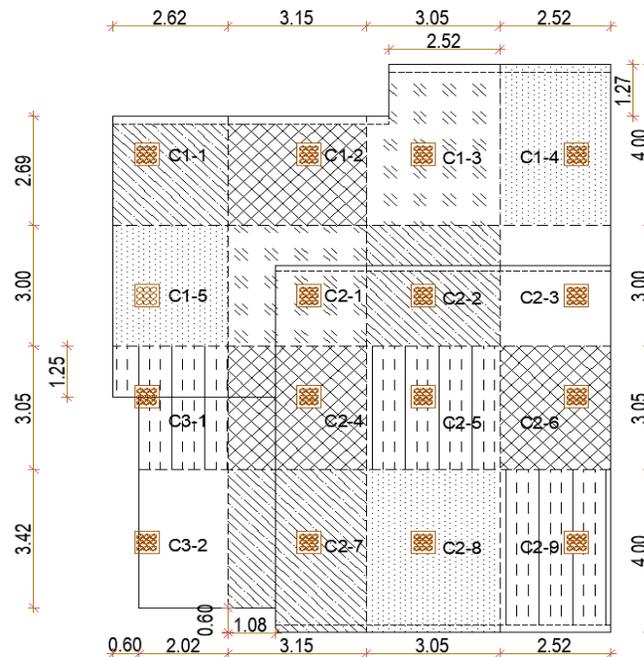
**Figura 175.** Configuración de las vigas de entrepiso con la losa y las columnas

### 6.6.7. Diseño de columnas

La vivienda tipo N°2 indicó en sus planos arquitectónicos que estará conformada por 16 columnas de bambú, mismas que teóricamente podrían estar compuestas de 1 o más culmos en función de sus cargas aplicadas y de los esfuerzos flexo-compresivos que incurran en la estructura. Para el diseño de estos elementos estructurales se utilizó los lineamientos que propone la Norma Técnica E.100 Bambú. Perú, como también el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, al igual que la vivienda N°1.

#### 6.6.7.1. Predimensionamiento de columnas

Para iniciar con el diseño de las columnas es importante predimensionar este elemento estructural a través de un análisis de áreas cooperantes dentro de la estructura vista en planta (ver Figura 176), lo cual permite analizar la distribución de cargas gravitatorias que actuarán en cada una de las columnas que se proponga.



**Figura 176.** Distribución de carga sobre columnas por análisis de área cooperante

### 6.6.7.2. Análisis y distribución de cargas

Calcular el peso propio los elementos de la planta alta y de cubierta que producen carga axial.

$$\text{Peso de cubierta (1)} = 119,12 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Peso de cubierta (2)} = 119,12 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Peso de entrepiso} = 318,02 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Acabados} = 100 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Terraza ajardinada} = 236,52 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Paredes exteriores} = 56,77 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Paredes interiores} = 28,06 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Pérgola} = 6,28 \text{ kg/m}^2$$

En la Tabla 107 se presenta un listado del peso total y el área cooperante que recibe cada columna (según la nomenclatura mostrada en la Figura 176).

**Tabla 107**

*Clasificación de las columnas por carga axial en el prediseño*

Columna	PW. Total kg/m <sup>2</sup>	Área cooperante m <sup>2</sup>	Fuerza axial kg/m	Clasificación Prediseño
C1-1	426,71	7,048	4210,55	Esquinera
C1-2	426,71	8,474	5062,30	Intermedia
C1-3	426,71	11,405	6813,60	Intermedia
C1-4	426,71	10,080	6022,06	Esquinera
C1-5	454,76	7,860	4916,31	Intermedia
C2-1	398,00	9,450	5374,38	Central
C2-2	398,00	9,150	5203,76	Central
C2-3	426,71	7,560	4516,55	Intermedia
C2-4	634,52	9,608	<b>7736,31</b>	Central
C2-5	398,00	9,303	5290,49	Central
C2-6	398,00	7,686	4371,16	Intermedia
C2-7	563,23	11,421	8382,41	Intermedia
C2-8	426,71	10,431	6231,76	Intermedia
C2-9	426,71	10,080	6022,06	Esquinera
C3-1	393,62	6,911	3881,35	Intermedia
C3-2	393,62	6,908	3879,89	Esquinera

Se procede a analizar el área que soportaría la carga axial máxima calculada de la Tabla 107 (7736,31 kgf = 75893,2 N), si el esfuerzo admisible a compresión es 31,63 MPa (para la espécimen *D. asper*).

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

$$\sigma = \text{esfuerzo}$$

$$P = \text{carga aplicada}$$

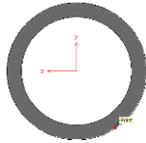
$$A = \text{área de contacto}$$

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

$$A = \frac{75893,20 \text{ N}}{31,63 \text{ N/mm}^2}$$

$$A = 2399,41 \text{ mm}^2$$

### 1 culmo de bambú



$$\text{Diámetro externo } (De) = 0,14 \text{ m} = 140 \text{ mm}$$

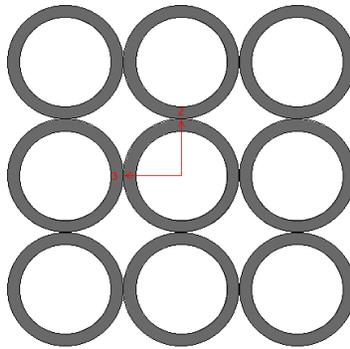
$$\text{Espesor } (e) = 0,015 \text{ m} = 15 \text{ mm}$$

$$An = 5890,49 \text{ mm}^2 > 2399,41 \text{ mm}^2$$

Al igual que en la vivienda N°1, teóricamente con un solo culmo de bambú la estructura estaría estructuralmente funcional, es decir, soportaría perfectamente las cargas axiales, pero en realidad no es así, ya que en las columnas incurren cargas horizontales críticas como la presión de viento y las sísmicas (estáticas/dinámicas), por lo cual las columnas a más de ser chequeadas por carga gravitatoria deben ser diseñadas a flexo-compresión a través de un análisis completo de la interacción del material en conjunto con la estructura.

#### 6.6.7.3. Tipo de columna

Las columnas de esta vivienda serán diseñadas mediante una configuración de 9 culmos de bambú (ver Figura 177, Tabla 108) debido al peralte y empate de las vigas longitudinales y transversales (ver Figura 175). Además esta configuración permitirá la continuidad de las columnas superiores logrando generar un solo elemento monolítico.



**Figura 177.** Configuración de columnas de 9 culmos

**Tabla 108**

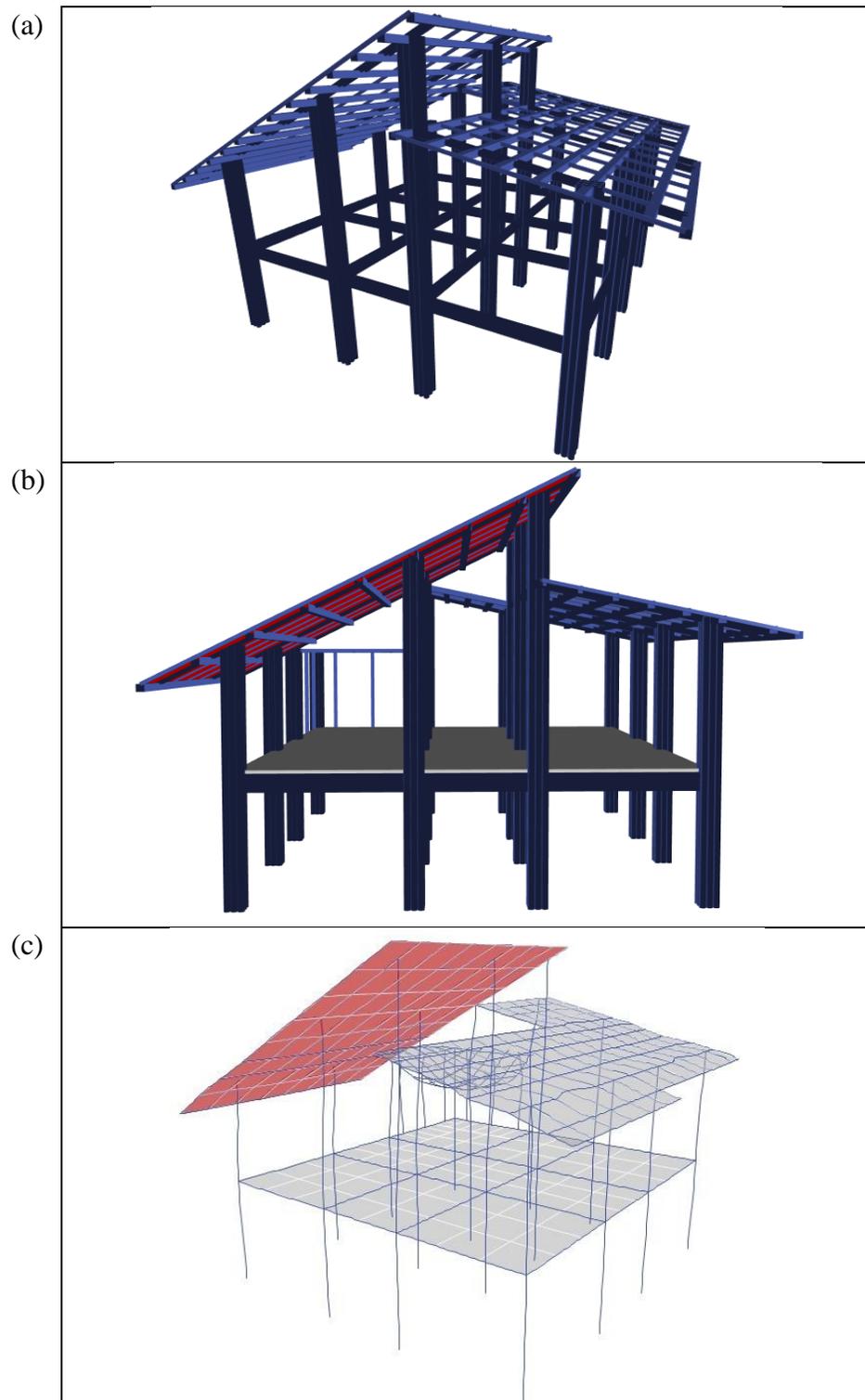
*Propiedades geométricas de la configuración de 9 culmos*

<b>Propiedades geométricas</b>	<b>9 Culmos</b>
<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	53014,38
<b>Centroide Xc (mm)</b>	0,00
<b>Centroide Yc (mm)</b>	0,00
<b>Inercia Ixx (mm<sup>4</sup>)</b>	7,98*10 <sup>8</sup>
<b>Inercia Iyy (mm<sup>4</sup>)</b>	7,98*10 <sup>8</sup>
<b>Módulo de sección elástico Sxx (mm<sup>3</sup>)</b>	3798837,70
<b>Módulo de sección elástico Syy (mm<sup>3</sup>)</b>	3798837,70
<b>Módulo de sección plástico Zxx (mm<sup>3</sup>)</b>	5615970,90
<b>Módulo de sección plástico Zyy (mm<sup>3</sup>)</b>	5615970,90

Se modeló la vivienda en el programa Etabs que permite analizar la estructura de forma completa y determinar las cargas exactas que absorben las columnas.

#### **6.6.7.4. Modelamiento Etabs**

Análisis estructural de la vivienda. Se procede a modelar la vivienda total en Etabs para chequear que el prediseño estructural tenga la óptima funcionalidad estructural de acción conjunta (ver Figura 178).



**Figura 178.** Modelamiento estructural en Etabs (a) diseño de vigas, columnas y estructura de cubierta, (b) vivienda cargada con losa, y cubiertas, y (c) respuesta mecánica de la estructura

Para el prediseño de la vivienda se procede a realizar un análisis estático modal espectral con el objetivo de verificar su porcentaje de participación de la masa en la estructura, la cual indica el sentido y dirección de movimiento (desplazamientos y torsión) que presenta el modelo ante las cargas aplicadas; para esto, se analiza sus modos de vibración fundamentales 1°, 2°, 3°, mismos que evidenciarán el nivel de rigidez y confirmarán el comportamiento funcional de la estructura (NEC-SE-RE, 2015).

- 1° modo de vibración = desplazamiento en X o Y casi puro (aproximadamente 90%)
- 2° modo de vibración = desplazamiento en X o Y casi puro (aproximadamente 90%)
- 3° modo de vibración = torsión mayor o igual al 50% en Z

Bajo estos principios, la estructura de la vivienda N°2 presentó resultados aceptables (ver Tabla 109), alcanzando un promedio del 75% en desplazamiento y 61% en torsión; estos valores teóricamente podrían ser más óptimos si se cambia a una nueva configuración de vigas, columnas y si se eleva la altura de la losa, pero en este caso ya se encuentran relativamente sobredimensionados dichos elementos y sería un mal criterio constructivo y económico rigidizar demasiado a la estructura.

**Tabla 109**

*Porcentaje de participación de masas de la estructura*

<b>Modelo con columnas de 9 culmos</b>		
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z (%)</b>
33,71	<b>68,32</b>	7,93
<b>78,50</b>	44,29	9,81
17,72	3,25	<b>61,43</b>
<b>Desplazamiento por sismo</b>	Ex	25,41 mm
	Ey	28,32 mm



**Paso 2:** Análisis de fuerzas y momentos actuantes en las columnas de la estructura.

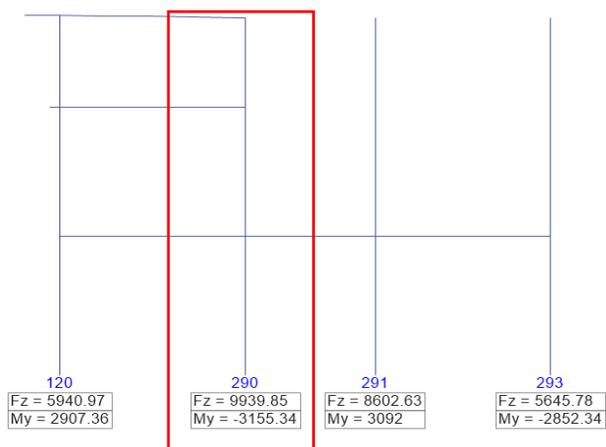
En la Tabla 110 se puede verificar que la columna más crítica en cuanto a carga axial y momento actuante está en la ubicación C2-4, por lo tanto el control de diseño se realizará en ésta, corroborando que si aprueba todas las verificaciones es lógico que el resto de columnas sean estructuralmente funcionales.

**Tabla 110**

*Carga axial y momento actuante en columnas*

Columna	ETABS (C. Axial) [kg]	ETABS (Momento)[kg-m]
C1-1	3985,12	2660,45
C1-2	6082,33	3064,2
C1-3	5911,2	3030,28
C1-4	4032,41	2678,75
C1-5	5686,09	2870,72
C2-1	9504,92	3125,1
C2-2	9078,35	3101,84
C2-3	6297,56	2841,29
<b>C2-4</b>	<b>9939,85</b>	<b>3155,34</b>
C2-5	8602,63	3092
C2-6	5645,78	2852,34
C2-7	6612,68	2827,31
C2-8	6346,64	2719,34
C2-9	4477,73	2406,77
C3-1	5940,97	2907,36
C3-2	3429,72	2817,61

**COLUMNA C2-4**



**Figura 180.** Resultados de la carga actuante en la columna C2-4

**Paso 3:** Cálculo de los esfuerzos admisibles modificados y módulos de elasticidad de diseño en compresión y flexión (Ver Tabla 111).

**Tabla 111**

*Esfuerzos admisibles y los factores de modificación que influyen*

Esfuerzos admisibles	$\sigma_{adm-flex}$	$\sigma_{adm-comp}$
		34,58 MPa
$C_D$	0,90	0,90
$C_m$	0,79	1,00
$C_t$	1,00	1,00
$C_F$	1,10	1,10
$C_L$	1,00	-
$C_r$	1,10	1,10
$C_p$	-	0,76
$C_c$	1,00	-
<b>Esfuerzos admisibles modificados</b>	$\sigma'_{adm-flex}$	$\sigma'_{adm-comp}$
	29,84 MPa	26,24 MPa
<b>Módulo de elasticidad <math>MOE_{0.05}</math></b>	14861,72 MPa	23453,63 MPa

\*El  $MOE_{0.05}$  para flexión fue modificado por el coeficiente de contenido de humedad ya que en laboratorio se obtuvo un C.H.=17%

**Paso 4:** Control por esfuerzos admisibles

$$Carga\ axial\ (F) = 9939,85\ kgf = 97509,90\ N$$

$$Momento = 3155,34\ kgf - m = 30943315\ N - mm$$

$$\sigma_{comp} = \frac{F}{A} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$$A = 53014,38\ mm^2$$

$$\sigma_{comp} = \frac{97509,90\ N}{53014,38\ mm^2}$$

$$\sigma_{comp} = 1,84\ MPa$$

$$1,84\ MPa \leq 26,24\ MPa\ \text{CUMPLE}$$

**Paso 5:** Chequeo de elemento solicitado a compresión axial

$$Le = Lu * k$$

$Le$  = Longitud efectiva del elemento en mm

$Lu$  = Longitud no soportada lateralmente del elemento en mm

$k =$  Coeficiente de longitud efectiva (ver Tabla 68)

$$L_u = 7,75 \text{ m}$$

$$L_e = 7750 * 1,0$$

$$L_e = 7750 \text{ mm}$$

Para elementos constituidos por 2 o más culmos

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

$$\text{Inercia (I)} = 797755912,60 \text{ mm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{797755912,60}{53014,38}}$$

$$r = 122,67 \text{ mm}$$

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

$\lambda =$  relación de esbeltez

$r =$  radio de giro de la sección en mm

$$\lambda = \frac{7750}{122,67}$$

$$\lambda = 63,178$$

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{MOE_{0.05}}{\sigma'_{adm-comp}}}$$

$C_k =$  límite entre columnas

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{23453,63}{26,24}}$$

$$C_k = 76,69$$

Según la Tabla 69 se clasifica como una **columna intermedia**

$$\sigma_{comp} = \frac{N_a}{A_n * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^3\right)} \leq \sigma'_{adm-comp}$$

$\sigma_{comp}$  = Esfuerzo de compresión actuante en MPa

$N_a$  = Fuerza de compresión aplicada en N

$A_n$  = Área neta del elemento en mm<sup>2</sup>

$\sigma'_{adm-compr}$  = Esfuerzo de compresión admisible modificado en MPa

$$\sigma_{comp} = \frac{97509,90 \text{ N}}{53014,38 * \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{63,178}{76,69}\right]^3\right)}$$

$$2,37 \leq 26,24 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo de elementos sometidos a flexo-compresión

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * MOE_{0,05} * I}{l_e^2}$$

$N_{cr}$  = Carga crítica de Euler en N

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 14861,72 * 797755912,60}{7750^2}$$

$$N_{cr} = 1948209,51 \text{ N}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left(\frac{N_a}{N_{cr}}\right)}$$

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 \left(\frac{97509,90}{1948209,51}\right)}$$

$$k_m = 1,081$$

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{adm-flex}$$

$$S = \frac{\pi * (D_e^4 - (D_e - 2e)^4)}{32 * D_e} * \#culmos$$

$\sigma_{flex}$  = Esfuerzo de flexión actuante en MPa

$\sigma'_{adm-flex}$  = Esfuerzo de flexión admisible modificado en MPa

$M$  = Momento actuante sobre el elemento en N – mm

$S$  = Módulo de sección en  $mm^3$

$$S = \frac{\pi * (140^4 - (140 - 2 * 15)^4)}{32 * 140} * 9$$

$$S = 1500496,18 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{flex} = \frac{30943315 \text{ N} - \text{mm}}{1500496,18 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{flex} = 20,62 \text{ MPa}$$

$$21,45 \leq 29,84 \text{ CUMPLE}$$

$$\frac{\sigma_{comp}}{\sigma'_{adm-comp}} + \frac{k_m * \sigma_{flex}}{\sigma'_{adm-flex}} \leq 1.0$$

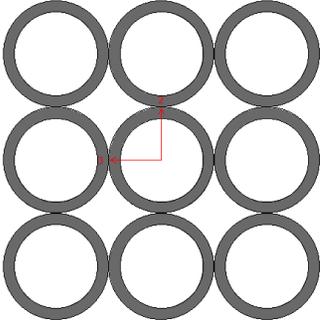
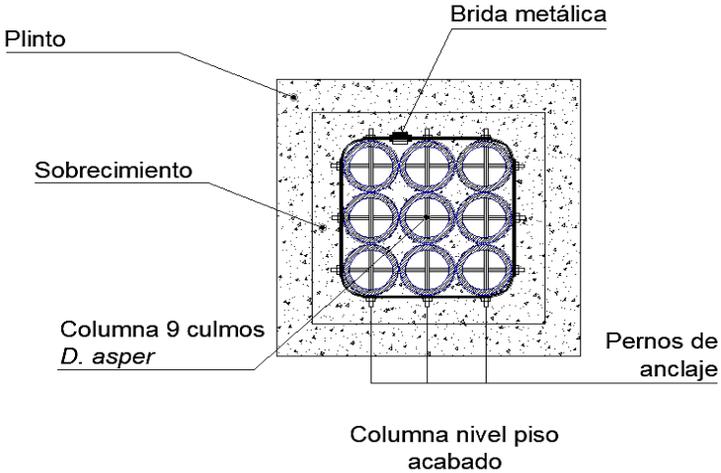
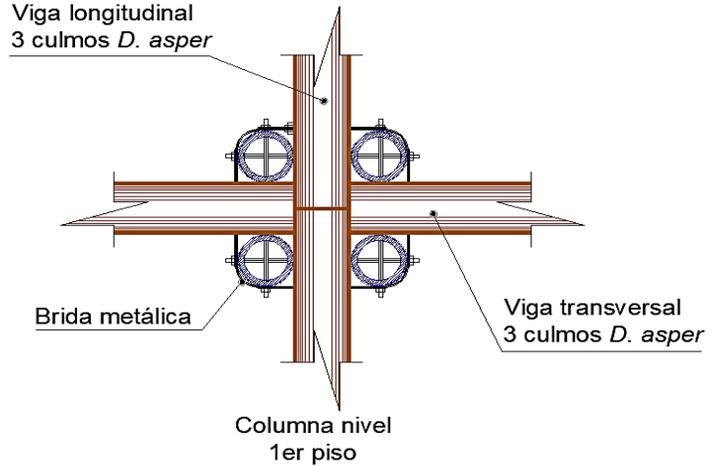
$$\frac{2,37}{26,24} + \frac{1,081 * 20,62}{29,84} \leq 1.0$$

$$0,837 \leq 1.0 \text{ CUMPLE}$$

### 6.6.7.6. Resumen de columnas

**Tabla 112**

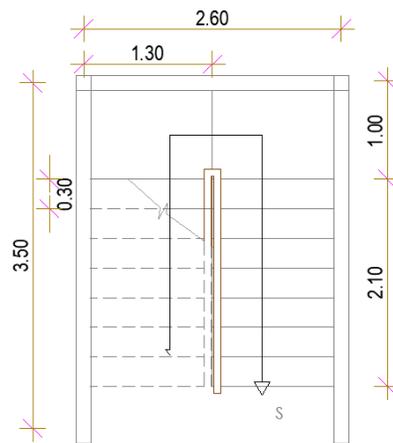
*Resumen del tipo de columna y su configuración para la vivienda N°2*

<p><b>CONFIGURACIÓN PARA TODAS LAS COLUMNAS DE LA ESTRUCTURA – VIVIENDA N°2</b></p>	<p><b>N° de Culmos:</b> 9</p>	
<p><b>Total: 16</b></p>	<p><b>Diámetro externo:</b> 140 mm</p>	<p><b>Espesor:</b> 15 mm</p>
	<p><b>Área:</b> 53014,38 mm<sup>2</sup></p>	
	<p><b>Longitud libre:</b> 7,75 m</p>	
<p><b>CONFIGURACIÓN DE COLUMNAS CON LOS ELEMENTOS DE ESTRUCTURA EN PLANTA BAJA</b></p>		
<p><b>CONFIGURACIÓN DE COLUMNAS CON LOS ELEMENTOS DE ESTRUCTURA EN PLANTA ALTA</b></p>		

## 6.6.8. Diseño de escaleras

### 6.6.8.1. Escalones –escaleras

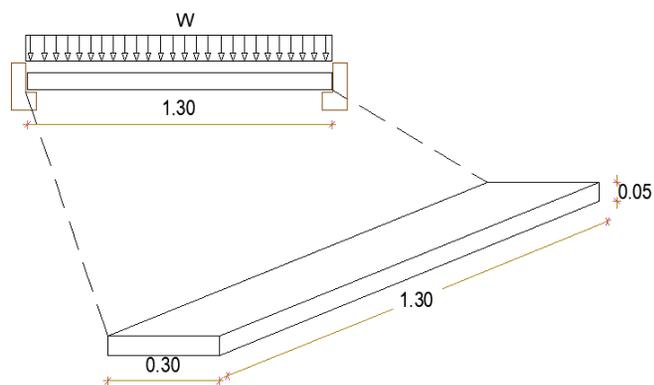
Se presenta el cálculo de la escalera fija de dos tramos para el proyecto (ver Figura 181), para este propósito se diseñará los escalones, zancas y los tablones de descanso con madera del Grupo C, debido a que son el grupo de maderas comercialmente más accesibles.



**Figura 181.** Escalera fija de dos tramos para vivienda N°2

#### 6.6.8.1.1. Control de diseño

Para el diseño de los escalones se tomó un modelo apoyado – apoyado; evaluado en un solo escalón, como lo muestra la Figura 182.



**Figura 182.** Modelo de escalón apoyado-apoyado (un escalón)

**Paso 1:** Análisis de cargas.

Se determina el peso propio del escalón por metro lineal

**Peso propio del escalón**

$$\text{Volumen de la huella (Hv)} = 0,30 \text{ m} * 1,30 \text{ m} * 0,05 \text{ m} = 0,0195 \text{ m}^3$$

*Madera Grupo B* = 900,01  $\text{kg}/\text{m}^3$  Manual de diseño para maderas del Grupo Andino.

$$\text{Peso propio Huella (Hp)} = 0,0195 \text{ m}^3 * 900 \text{ kg}/\text{m}^3 = 17,55 \text{ kg}$$

$$\text{P.p.H por metro lineal} = \frac{17,55 \text{ kg}}{1,30 \text{ m}} = 13,50 \text{ kg}/\text{m}$$

Se establecen pesos adicionales que conllevan al análisis

**Peso de accesorios**

$$\text{Peso de pernos} + \text{escuadrones} + \text{bridas} = 12,0 \text{ kg}/\text{m}$$

Se realiza la sumatoria de las cargas permanentes que actúan en el escalón

$$\sum D = 13,50 \text{ kg}/\text{m} + 12 \text{ kg}/\text{m}$$

$$D = 25,50 \text{ kg}/\text{m}$$

**Carga temporal**

Área del escalón:

$$\text{Área} = 1,30 \text{ m} * 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 0,39 \text{ m}^2$$

Se asume que en un metro cuadrado el peso de 4 personas es de 300 kg, entonces para el área del escalón se calcula como un estimado de personas en peso.

$$1 \text{ m}^2 \rightarrow 300 \text{ kg}$$

$$0.39 \text{ m}^2 \rightarrow x$$

$$x = 117 \text{ kg}$$

Se procede a la determinación del peso por metro lineal.

$$L = \frac{117 \text{ kg}}{1,30 \text{ m}} = 90 \text{ kg/m}$$

Se calcula el peso total que actúa en el escalón.

$$W = D + L$$

$$W = 25,50 \text{ kg/m} + 90 \text{ kg/m} = 115,50 \text{ kg/m}$$

**Paso 2:** Esfuerzos admisibles

A continuación se muestran los esfuerzos admisibles según el tipo de madera (Grupo C). Se mayoran los esfuerzos de flexión y corte en un 10%, respondiendo a la norma para diseño de maderas (JUNAC, 1984).

$$MOE_{prom} = 90000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{adm-flex} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 1,10 = 110 \text{ kg/cm}^2$$

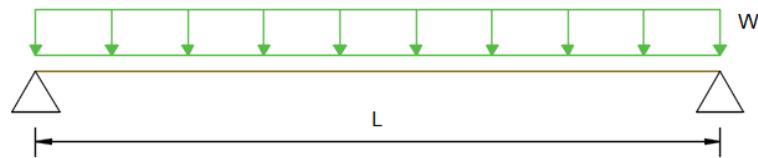
$$\sigma_{adm-comp} = 80 \text{ kg/cm}^2 = 80 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{adm-corte} = 8 \text{ kg/cm}^2 * 1,10 = 8,80 \text{ kg/cm}^2$$

**Paso 3:** Chequeo de deflexiones

$$\Delta_{max} < \Delta_{permisible}$$

Se verifica la deflexión sobre la viga de acuerdo a la siguiente fórmula:



$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 * W * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 * 1,155 \text{ kg/cm} * (130 \text{ cm})^4}{384 * 90000 \text{ kg/cm}^2 * \frac{30 \text{ cm} * (5 \text{ cm})^3}{12}}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = 0,15 \text{ cm}$$

Este valor debe cumplir la condici3n de ser menor que la deflexi3n permisible igual a:

$$\Delta_{permisible} = \frac{L}{250} = \frac{130 \text{ cm}}{250} = 0,52 \text{ cm}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} < \Delta_{permisible}$$

$$0,15 \text{ cm} < 0,52 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 4:** Determinar el momento y cortante máximo de elemento estructural en análisis.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{WL^2}{8} = \frac{115,50 * 1.30^2}{8}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 24,40 \text{ kg} - m$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{WL}{2} = \frac{115,50 * 1.30}{2}$$

$$V_{m\acute{a}x} = 75,07 \text{ kg}$$

**Paso 5:** Momento de inercia limitado por deflexiones

$$\frac{5 W L^4}{384 MOE * I} < \frac{L}{k}$$

$k = \Delta$  admisible

$$I > \frac{5 W L^4}{384 * MOE} < \frac{L}{R}$$

$$\therefore I > \frac{5 W L^3 k}{384 * MOE}$$

$$I > \frac{5 * 1,155 \frac{kg}{cm} * 130^3 cm^3 * 250}{384 * 90000}$$

$$I_{NECESARIO} = 91,78 cm^4$$

$$I_{NECESARIO} < I_{REQUERIDO}$$

$$I_{requerida} = \frac{b h^3}{12} = 312,5 cm^4$$

$$91,78 cm^4 < 312,5 cm^4 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 6:** Determinar el módulo de la sección Z necesario por resistencia

$$Z = \frac{M_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{adm-flex}}}; Z = \frac{2440 \text{ kgf} - \text{cm}}{110 \text{ kgf}/\text{cm}^2}$$

$$Z = 22,18 cm^3$$

El valor Z debe cumplir la siguiente condición:

$$Z_{NECESARIO} < Z_{REQUERIDO}$$

$$Z_{REQUERIDO} = \frac{b * h^2}{6} cm^3$$

$$Z_{REQUERIDO} = \frac{30 * 5^2}{6} \text{ cm}^3$$

$$Z_{REQUERIDO} = 125 \text{ cm}^3$$

$$22,18 \text{ cm}^3 < 125 \text{ cm}^3 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 7:** Chequeo por deflexiones diferidas

$$D = 13,50 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 12,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 25,50 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$M_{max} = \frac{(25,50 \text{ kg/m}) * (1,30 \text{ m})^2}{8} = 5,40 \text{ kg} - \text{m}$$

$$Z = \frac{b h^2}{6} = \frac{(0,30 \text{ m}) * (0,05 \text{ m})^2}{6} = 0,000125 \text{ m}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{5,40 \text{ kg} - \text{m}}{0,000125 \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 43096 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 4,31 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{difer} < 0,6 \sigma_{adm-flex}$$

$$4,31 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} < 66,0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 8:** Comprobación del esfuerzo cortante

$$W * h \leq V_{max}$$

$$1,155 \text{ kg/cm} * 5 \text{ cm} \leq 75,07 \text{ Kg}$$

$$5,78 \ll 75,07 \text{ Kg} \text{ CUMPLE}$$

### Verificación del cortante en la sección crítica

Para calcular el cortante en la sección crítica utilizamos la siguiente fórmula

$$\tau = \frac{1,5 * (W * h)}{b * h} = \frac{1,5 * 5,78}{30 * 5}$$

$$\tau = 0,058 \frac{kg}{cm^2} \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$\tau = 0,058 \frac{kg}{cm^2} \leq 8,80 \frac{kg}{cm^2} \quad \text{CUMPLE}$$

### Verificación de la estabilidad lateral

Primero realizamos la relación entre alto y ancho de la viga

$$\frac{h}{b} = \frac{5}{30} = 0,1667$$

$$0,1667 < 2 \quad \text{no necesita apoyo lateral}$$

### Verificación de la longitud de apoyo

Para determinar la longitud de apoyo mínima utilizamos la siguiente fórmula:

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

Para este caso asumimos que el valor de R es igual a la suma en valor absoluto de los cortantes que se aplican en sus apoyos.

$$R = 75,07 \text{ kg}$$

$$a = \frac{75,07}{30 * 80} = 0,031$$

$$a = 0,0031 \text{ cm} < a_{asumido} = 5 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

## 6.6.8.2. Diseño de tablón de descanso

### 6.6.8.2.1. Control de diseño

**Paso 1:** Análisis de Cargas

Se asume un espesor de descanso de  $h = 0,05 \text{ m}$ .

Volumen del tablón:

$$V = (1,30\text{m} * 1,00\text{m} * 0,05\text{m}) = 0,065 \text{ m}^3$$

$$0,065 \text{ m}^3 * 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 58,50 \text{ kg}$$

Peso accesorios  $12.0 \text{ kg/m}$

**Carga temporal:**

$$A = 1,30 \text{ m} * 1,00 \text{ m} = 1,30 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ m}^2 \rightarrow 300 \text{ kg}$$

$$1,30 \text{ m}^2 \rightarrow x = \frac{1,30 \text{ m}^2 * 300 \text{ kg}}{1 \text{ m}^2} = 390 \text{ kg}$$

$$L = \frac{390 \text{ kg}}{1,30 \text{ m}} = 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$WT = D + L = 58,50 + 12 + 300 \text{ kg/m}$$

$$WT = 370,50 \text{ kg/m}$$

**Paso 2:** Comprobación de deflexiones admisibles

$$\Delta_{max} = \frac{5 WT L^4}{384 MOE I}$$

$$I = \frac{b h^3}{12} = \frac{(100 \text{ cm}) * (5 \text{ cm})^3}{12} = 1041,67 \text{ cm}^4$$

$$L_{efectiva} = 130 \text{ cm} - 2 * (5 \text{ cm}) = 120 \text{ cm}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 (3,705 \text{ kg/cm}) (120 \text{ cm})^4}{384 * (90000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}) * (1041,67 \text{ cm}^4)} = 0,11 \text{ cm}$$

$$\Delta_{adm} = \frac{120 \text{ cm}}{250} = 0,48 \text{ cm}$$

$$\Delta_{max} < \Delta_{adm}$$

$$0,11 \text{ cm} < 0,48 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 3:** Comprobación del esfuerzo máximo

$$\sigma_{max} = \frac{6 M}{b h^2}$$

$$M_{max} = \frac{WT * L^2}{8} = \frac{(370,50 \text{ kg/m}) * (1,30 \text{ m})^2}{8} = 78,27 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\sigma_{max} = \frac{6 * (78,27 \text{ kg} \cdot \text{m})}{(1 \text{ m}) * (0,05 \text{ m})^2} = 187848 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_{max} = 18,78 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{max} < \sigma_{adm-comp}$$

$$18,78 \text{ kg/cm}^2 < 80 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 4:** Comprobación del esfuerzo máximo

$$V_{max} = \frac{WT * L}{2} = \frac{(370,50 \text{ kg/m}) * (1,30 \text{ m})}{2} = 240,82 \text{ kg}$$

$$v_c = \frac{V_{max}}{b * h}$$

$$v_c = \frac{240,82 \text{ kg}}{(1 \text{ m}) * (0,05 \text{ m})} = 4816,40 \text{ kg/m}^2$$

$$v_c = 0,4816 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_c < \sigma_{adm-corte}$$

$$0,4816 \text{ kg/cm}^2 < 8,80 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 5:** Chequeo por deflexiones diferidas

$$D = 58,50 \text{ kg/m} + 12,0 \text{ kg/m}$$

$$D = 70,50 \text{ kg/m}$$

$$M_{max\text{differ}} = \frac{(70,50 \text{ kg/m}) * (1,30 \text{ m})^2}{8} = 14,89 \text{ kg} - \text{m}$$

$$Z = \frac{b h^2}{6} = \frac{(1 \text{ m}) * (0,05 \text{ m})^2}{6} = 0,00042 \text{ m}^3$$

$$\sigma_D = \frac{M_{\max D}}{Z} = \frac{14,89 \text{ kg} - \text{m}}{0,00042 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_D = 35452 \text{ kg/m}^2 = 3,54 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_D < 0.6 \sigma_{adm-flex}$$

$$3,54 \text{ kg/cm}^2 < 66 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 6:** Comprobación de la estabilidad lateral

$$\frac{h}{b} = \frac{5 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = 0,05 \text{ cm}$$

$$0,05 < 2.0$$

*No necesita apoyo lateral*

**Paso 7:** Comprobación de la longitud de apoyo

$$a_{asumida} = 5 \text{ cm}$$

$$V_{\max} = 240,82 \text{ kg} = R$$

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

$$a = \frac{240,82 \text{ kg}}{(100 \text{ cm}) * (80 \text{ kg/cm}^2)}$$

$$a = 0,03 \text{ cm}$$

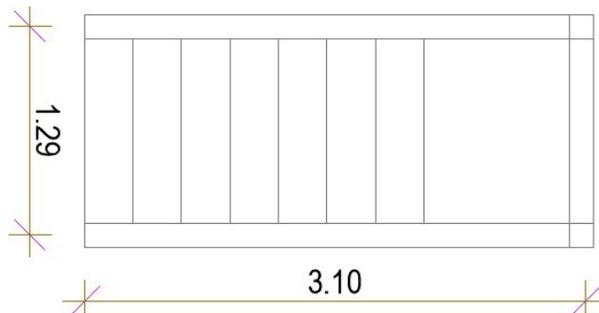
$$a < a_{asumida}$$

$$0,03 \text{ cm} < 5 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

### 6.6.8.3. Diseño de Zancas (ver Figura 183)

#### 6.6.8.3.1. Control de diseño

**Paso 1:** Análisis de Cargas



**Figura 183.** Modelo de zanca

$$\# \text{ escalones} = \frac{1,00}{0,30} = 3,33 \text{ escalones}$$

$$\text{Huellas: } V = 3,33 * (0,30\text{m} * 1,30\text{m} * 0,05\text{m}) = 0,065 \text{ m}^3$$

$$0,065 \text{ m}^3 * 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 58,44 \text{ kg}$$

$$\text{Peso x ml} = \frac{\text{PpHuella}}{\text{Ancho escalera}} \text{ kg/m}$$

$$\text{Peso x ml} = \frac{58,44}{1,30} = 44,95 \text{ kg/m (Se asume incluido el descanso)}$$

Peso accesorios: 12.0 kg/m

Peso Pasa Manos: 5,0 kg/m

**Carga temporal:**

$$A = 3,10 \text{ m} * 1,30 \text{ m} = 4,03 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ m}^2 \rightarrow 300 \text{ kg}$$

$$4,03 \text{ m}^2 \rightarrow x = \frac{4,03 \text{ m}^2 * 300 \text{ kg}}{1 \text{ m}^2} = 1209 \text{ kg}$$

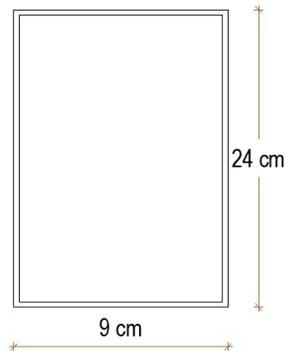
$$L = \frac{1209 \text{ kg}}{3,10 \text{ m}} = 390 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{WT} = 390 + 44,95 + 12 + 5 \text{ kg/m} = \mathbf{451,95 \text{ kg/m}}$$

$$\text{Inclinación} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{8 \text{ escalones} * 0,18 \text{ m}}{3,10 \text{ m}} \right) = 24,92^\circ$$

$$\text{WT} - \text{proyectada} = \cos(24,92) * 451,95 = \mathbf{409,91 \text{ kg/m}}$$

Se asume una sección como se indica en la Figura 184.



**Figura 184.** Sección del elemento asumido para zancas

**Paso 2:** Chequeo de deflexiones

$$\Delta_{\max} < \Delta_{\text{permisible}}$$

Se verifica la deflexión sobre la viga de acuerdo a la siguiente fórmula:



$$\Delta_{\max} = \frac{5 * WT - p * L^4}{384 * MOE * I}$$

$$\Delta_{\max} = \frac{5 * 4,10 \text{ kg/cm} * (310 \text{ cm})^4}{384 * 90000 \text{ kg/cm}^2 * \frac{9 \text{ cm} * (24 \text{ cm})^3}{12}}$$

$$\Delta_{\max} = 0,53 \text{ cm}$$

Este valor debe cumplir la condición de ser menor que la deflexión permisible igual a:

$$\Delta_{\text{permisible}} = \frac{L}{250} = \frac{310 \text{ cm}}{250} = 1,24 \text{ cm}$$

$$\Delta_{\max} < \Delta_{\text{permisible}}$$

$$0,54 \text{ cm} < 1,24 \text{ cm} \text{ CUMPLE}$$

**Paso 3:** Determinar el momento y cortante máximo de elemento estructural en análisis.

$$M_{\text{máx}} = \frac{WT - p * L^2}{8} = \frac{409,91 * 3,10^2}{8}$$

$$M_{\text{máx}} = 492,40 \text{ kg} - m$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{WT - p * L}{2} = \frac{418,72 * 3,10}{2}$$

$$V_{\text{máx}} = 635,36 \text{ kg}$$

**Paso 4:** Momento de inercia limitado por deflexiones

$$\frac{5 * WT - p * L^4}{384 * MOE * I} < \frac{L}{k}$$

$$k = \Delta \text{ admisible}$$

$$I > \frac{5 * WT - p * L^4}{384 * MOE} < \frac{L}{R}$$

$$\therefore I > \frac{5 * WT - p * L^3 * k}{384 * MOE}$$

$$I > \frac{250 * 5 * 4,10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} * 310^3 \text{ cm}^3}{384 * 90000}$$

$$I_{\text{NECESARIO}} = 4417,79 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{NECESARIO}} < I_{\text{REQUERIDO}}$$

$$I_{\text{requerida}} = \frac{b h^3}{12}$$

$$\frac{9 * 24^3}{12} = 10368 \text{ cm}^4$$

$$4417,79 \text{ cm}^4 < 10368 \text{ cm}^4 \text{ CUMPLE}$$

**Paso 5.** Determinar el módulo de la sección Z necesario por resistencia

$$Z = \frac{M_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{adm-flex}}} ; Z = \frac{492,40 * 100 \text{ kgf} - \text{cm}}{110 \text{ kgf} / \text{cm}^2}$$

$$Z = 447,64 \text{ cm}^3$$

El valor Z debe cumplir la siguiente condición:

$$Z_{\text{NECESARIO}} < Z_{\text{REQUERIDO}}$$

El módulo Z requerido se lo obtiene de la tabla 13.1; propiedades le escuadría para una sección de b x h =30 x 5 cm del grupo A. alrededor del eje x

$$Z_{\text{REQUERIDO}} = \frac{b * h^2}{6} = \frac{9 * 24^2}{6} \text{ cm}^3$$

$$Z_{\text{REQUERIDO}} = 864 \text{ cm}^3$$

$$447,64 \text{ cm}^3 < 20736 \text{ cm}^3 \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 6:** Chequeo por deflexiones diferidas

$$D = 56,18 \text{ kg/m (carga proyectada)}$$

$$M_{-D} = \frac{(56,18 \text{ kg/m}) * (3,10 \text{ m})^2}{8} = 67,49 \text{ kg} - \text{m}$$

$$Z = \frac{b h^2}{6} = \frac{(0,09 \text{ m}) * (0,24 \text{ m})^2}{6} = 0,000864 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{-D} = \frac{M_{\text{max-D}}}{Z} = \frac{67,49 \text{ kg} - \text{m}}{0,000864 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{-D} = 78113,4 \text{ kg/m}^2 = 7,81 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{-D} < 0,6 \sigma_{\text{adm-flex}}$$

$$7,81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} < 66 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \text{CUMPLE}$$

**Paso 7:** Comprobación del esfuerzo cortante

$$W * h \leq V_{\text{max}}$$

$$409,91 \frac{kg}{m} * 0,24 m \leq 635,36 Kg$$

$$98,37 \ll 635,36 Kg \quad \text{CUMPLE}$$

### Verificación del cortante en la sección crítica

Para calcular el cortante en la sección crítica utilizamos la siguiente fórmula

$$\tau = \frac{1,5 * (W * h)}{b * h} = \frac{1,5 * 98,37}{9 * 24}$$

$$\tau = 0,68 \frac{kg}{cm^2} \leq \sigma_{adm-corte}$$

$$\tau = 0,68 \frac{kg}{cm^2} \leq 8,8 \frac{kg}{cm^2} \quad \text{CUMPLE}$$

### Verificación de la estabilidad lateral

Primero realizamos la relación entre alto y ancho de la viga

$$\frac{h}{b} = \frac{24}{9} = 2,67$$

$$2,67 > 2 \quad \therefore \text{Restricción de desplazamiento lateral en los apoyos}$$

### Verificación de la longitud de apoyo

Para determinar la longitud de apoyo mínima utilizamos la siguiente fórmula:

$$a = \frac{R}{b * \sigma_{adm-comp}}$$

Para este caso asumimos que el valor de R es igual a la suma en valor absoluto de los cortantes que se aplican en sus apoyos.

$$R = V = 635,36 kg$$

$$a = \frac{635,36 kg}{9 cm * 80 kg/cm^2} = 0,88 cm$$

$$a = 0,88 < a_{asumido} = 8 cm \quad \text{CUMPLE}$$

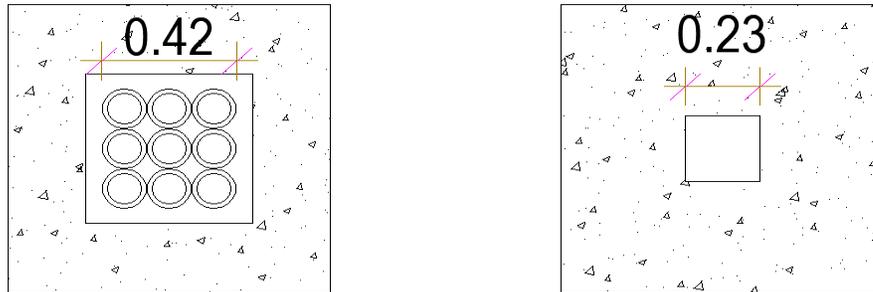
### 6.6.9. Diseño de cimentaciones

Para iniciar el cálculo de cimentaciones se procede a tomar la carga axial de diseño más crítica que se haya generado en el análisis de todos los tipos de columnas (ver Figura 185); para el caso de esta vivienda solamente existió un tipo de columna cuya carga máxima permitirá el diseño de la cimentación.



**Figura 185.** Cargas axiales de todas las columnas de la vivienda N°2

Cabe mencionar que la tipología de cimentación de la presente vivienda contará únicamente con plintos aislados, los mismos que serán unidos hacia las columnas de bambú mediante un sobrecimiento que permitan el anclaje perfecto con la estructura de fundación (ver Figura 186).



**Figura 186.** Plintos aislados para la cimentación (a) modelo real con columnas de bambú y (b) modelo equivalente con columnas de hormigón

### 6.6.9.1. Análisis de cargas y predimensionamiento

La columna que más aporte de carga obtuvo fue la C2-4 (ubicación en planta en la Figura 176) con 9939,85 kgf distribuido a lo largo de la configuración del elemento estructural. A este aporte es necesario sumarle el peso propio de la columna de 9 culmos.

- Carga axial de cubierta, entrepiso y paredes:  **$P_a = 9939,85 \text{ kgf}$**
- Peso propio de columnas (9 culmos):  $P_{pc} = 53014,38 \text{ mm}^2 * (1/1000^2) * 7,75 \text{ m} * 686,04 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{281,87 \text{ kgf}}$

$$\mathbf{\text{Peso total: } P = 9939,85 + 281,87 = 10221,72 \text{ kgf} = 10,222 \text{ Tn}}$$

- Hormigón:  **$f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$**
- Acero:  **$f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$**
- Esfuerzo admisible del suelo de Quevedo:  **$\sigma_s = 7 \text{ T/m}^2$**  (Valor referencial hasta obtener un estudio de suelos completo de la zona a implementar)
- Altura de fundación:  **$h_{\text{plinto}} = 1,00 \text{ m}$**

### 6.6.9.2. Control de diseño

**Paso 1:** Verificación del área de fundación.

$$A^F = \frac{P + \%P [Tn]}{\sigma_s}$$

$A^F$  = Área de fundación en  $m^2$

$P$  = Peso total que llega al cimiento en Tn

$\%P$  = Porcentaje de carga de seguridad (10%)

$$A^F = \frac{10,222 * 1,10}{7}$$

$$A^F = 1,606 \text{ m}^2$$

$$A = B = \sqrt{A^F}$$

$A$  = Lado 1 del plinto aislado en (m)

$B$  = Lado 2 del plinto aislado en (m)

$$A = B = \sqrt{1,606}$$

$$A = B = 1,27 \text{ m}$$

$$A^F \text{ Adoptado} = 1,40 * 1,40 = 1,96 \text{ m}^2$$

**Paso 2:** Verificación de presión del suelo (ver Figura 187).

$$PNS = \frac{P}{A^F \text{ Adop}}$$

$PNS$  = Presión de la estructura ejercida sobre el suelo en ( $Tn/m^2$ )

$$PNS = \frac{10,222}{1,96}$$

$$PNS = 5,22 \text{ Tn/m}^2$$

$$PNS < \sigma_s$$

$$5,22 \text{ Tn/m}^2 < 7 \text{ Tn/m}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

$$f_{may} = \frac{1,2D + 1,6L}{D + L}$$

$f_{may}$  = factor de mayoración para la presión que ejerce la estructura

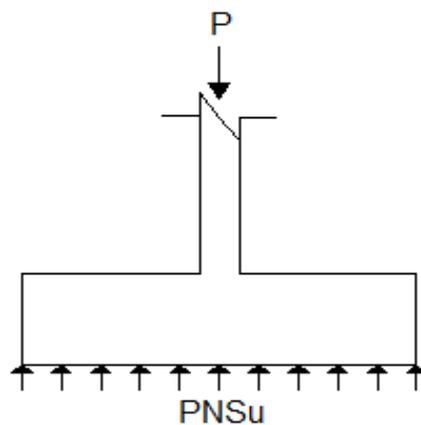
$f_{may} = 1,28$  Por carga de servicio

$$PNS_u = PNS * f_{may}$$

$PNS_u$  = Presión neta del suelo última

$$PNS_u = 5,22 * 1,28$$

$$PNS_u = 6,68 \text{ Tn/m}^2$$



**Figura 187.** Esquema de la fuerza actuante que se ejerce sobre el plinto y la presión del suelo en sentido contrario

**Paso 3:** Chequeo del corte unidireccional

Para cumplir con el cortante unidireccional, el cortante último deberá ser menor o en un caso crítico hasta igual al cortante permisible:

$$v_u \leq v_p$$

$$v_u = \text{cortante último unidireccional en Tn/m}^2$$

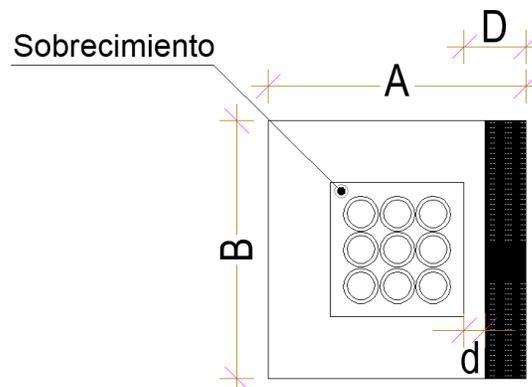
$$v_p = \text{cortante permisible en Tn/m}^2$$

$$v_u = \frac{Vu}{d * b * \phi} \quad \text{y} \quad v_p = 0,53 * \sqrt{f'c}$$

$$d = \text{altura del plinto sin el recubrimiento}$$

$$b = \text{Lado 1 o 2 de análisis del plinto}$$

El cortante unidireccional se chequea a una distancia  $d$  de la cara de la columna, como se observa en la Figura 188. Para poder continuar con el diseño del plinto se lo puede realizar mediante iteraciones, imponiendo una altura  $h$ ; o caso contrario se puede igualar  $v_u = v_p$ , teniendo el caso más crítico y obtener a través de ecuaciones la altura ( $h$ ), para luego adoptarla con criterio técnico.



**Figura 188.** Detalle del chequeo del corte unidireccional en plintos aislados

$$h_{ASUMIDO} = 25,0 \text{ cm}$$

$$\text{recubrimiento} = 7,5 \text{ cm}$$

$$d = 0,25\text{m} - 0,075\text{m} = 0,175\text{m}$$

$$d_{ASUMIDO} = 17,5 \text{ cm}$$

$$A = B = 1,40 \text{ m}$$

$$D = \frac{B - \text{sobrecimiento}}{2}$$

$$D = \frac{1,40 \text{ m} - 0,50 \text{ m}}{2}$$

$$D = 0,45 \text{ m}$$

$$L_v \text{ longitud de volado} = D - d$$

$$L_v = 0,45 - 0,175$$

$$L_v = 0,275 \text{ m}$$

$$Vu = PNs_u * (L_v) * B$$

$$Vu = 6,68 * (0,275) * 1,40$$

$$Vu = 2,57 \text{ Tn}$$

$$v_u = \frac{Vu}{d * b * \phi}$$

$$v_u = \frac{2,57}{0,175 * 1,40 * 0,75}$$

$$v_u = 13,99 \text{ Tn/m}^2$$

$$v_p = 0,53 * \sqrt{f'c}$$

$$v_p = 0,53 * \sqrt{210} * 9,81$$

$$v_p = 75,59 \text{ Tn/m}^2$$

$$13,99 \text{ Tn/m}^2 < 75,59 \text{ Tn/m}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

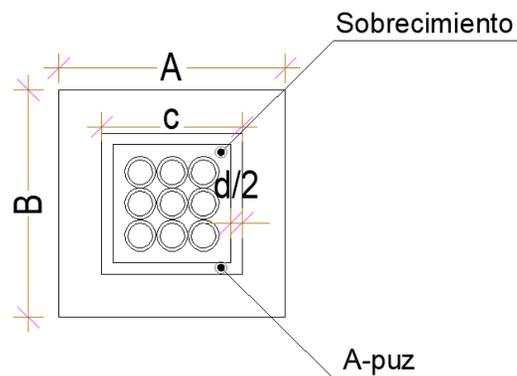
**Paso 4:** Chequeo del corte bidireccional.

Para cumplir con el cortante bidireccional, el cortante último debe ser menor o en su defecto igual al cortante permisible:

$$v_u \leq v_p$$

$$v_u = \frac{Vu}{d * b_o * \phi} \quad y \quad v_p = 1,06 * \sqrt{f'c}$$

El cortante bidireccional se chequea a una distancia  $d/2$  de la cara de la columna en todos los sentidos, tal como se muestra en la Figura 189:



**Figura 189.** Detalle del chequeo del corte bidireccional en plintos aislados

Para calcular el  $V_u$ :

$$Vu = PNs_u * (A_T - A_{PUN})$$

$$A_T = \text{Área total de fundación}$$

$$A_{PUN} = a_{PUN} * a_{PUN}$$

$$A_{PUN} = \text{Área de punzonamiento}$$

$$a_{PUN} = \text{sobrecimiento} + d$$

$$a_{PUN} = \text{Ancho de punzonamiento}$$

$$a_{PUN} = 0,50 + 0,175 \text{ m}$$

$$a_{PUN} = 0,68 \text{ m}$$

$$A_{PUN} = a_{PUN} * a_{PUN}$$

$$A_{PUN} = 0,68 * 0,68 \text{ m}^2$$

$$A_{PUN} = 0,46 \text{ m}^2$$

$$\therefore Vu = PNS_u * (A_T - A_{PUN})$$

$$\therefore Vu = 6,68 \frac{Tn}{m^2} * ((1,40 * 1,40) - 0,46)$$

$$\therefore Vu = 10,04 \text{ Tn}$$

Cálculo del **bo**, el cual es el perímetro de punzonamiento:

$$bo = (2 * a_{PUN}) + (2 * a_{PUN})$$

$$bo = (2 * 0,68) + (2 * 0,68) = 2,70 \text{ m}$$

Reemplazar datos en la ecuación inicial para el caso más crítico:

$$v_u = \frac{Vu}{d * bo * \phi}$$

$$v_u = \frac{10,04 \text{ Tn}}{0,175 * 2,70 * 0,75} = 28,34 \text{ Tn/m}^2$$

$$v_p = 1,06 * \sqrt{f'c}$$

$$v_p = 1,06 * \sqrt{210} = 15,36 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_p = 151,18 \text{ Tn/m}^2$$

$$28,34 \text{ Tn/m}^2 \leq 151,18 \text{ Tn/m}^2 \quad \text{CUMPLE}$$

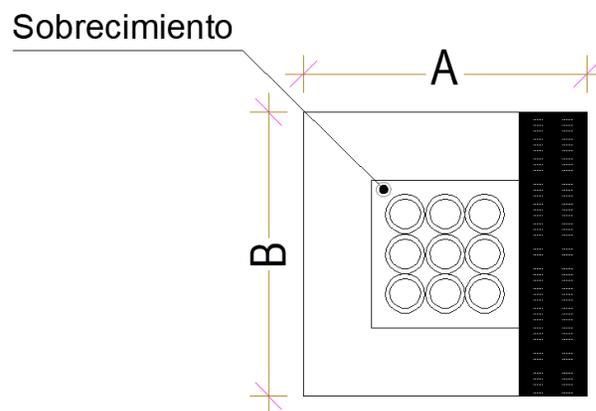
Después de haber chequeado los cortantes unidireccional y bidireccional, se puede resumir que el plinto tiene la siguiente altura definitiva:

$$h_{DEFINITIVA} = 25 \text{ cm}$$

$$d_{DEFINITIVA} = 17,5 \text{ cm}$$

**Paso 5:** Diseño a flexión

Se procede a calcular el momento flector, el mismo que se lo analiza entre la cara del sobrecimiento y el borde del cimiento (ver Figura 190)



**Figura 190.** Sector de análisis del momento flector

$$Mu = PNS_u * \frac{Lv^2}{2} * B$$

$$Lv \text{ (longitud de volado)} = \frac{B - \text{sobrecimiento}}{2}$$

$$v = \frac{1,40 - 0,50}{2}$$

$$Lv = 0,45 \text{ m}$$

$$\therefore Mu = 6,68 * \frac{0,45^2}{2} * 1,40 \text{ Tn} - \text{m}$$

$$\therefore Mu = 0,95 \text{ Tn} - \text{m}$$

A partir del momento flector calculado, el siguiente paso es calcular la cuantía y el área de acero necesaria para el plinto:

$$\rho = 0,85 \left( \frac{f'c}{fy} \right) \left( 1 - \left( 1 - \frac{2 * Mu}{\phi * 0,85 * f'c * b * d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$\rho = 0,85 \left( \frac{210}{4200} \right) \left( 1 - \left( 1 - \frac{2 * 1,18 * 10^5}{0,90 * 0,85 * 210 * 150 * 17,5^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$\rho = 0,00059 < \rho_{min} = \frac{14}{fy} = 0,0033$$

Se toma la cuantía mínima para el acero, por la razón que la cuantía calculada resultó menor. Ahora se procede a calcular el área de acero que se colocará en el plinto.

$$As = \rho * b * d$$

$$As = 0,0033 * 140 * 17,5$$

$$As = 8,17 \text{ cm}^2$$

El área de acero obtenida se puede distribuir de la siguiente manera:

$$\text{Espaciamiento} = 15 \text{ cm}$$

$$\text{Recubrimiento} = 7,5 \text{ cm}$$

$$\text{número de varillas} = \frac{(1,40 - 0,15)}{0,15} + 1$$

$$\text{número de varillas} = 9$$

$$\phi \text{ varilla} = \frac{As}{\text{número de varillas}}$$

$$\phi \text{ varilla} = \frac{8,17}{9}$$

$$As_{unit} = 0,91$$

$$\phi \text{ varilla} = \phi 12 \text{ mm}$$

Entonces el armado del plinto aislado será:

$$\mathbf{9\phi 12 \text{ mm} (1\phi 12 \text{ mm} @ 15 \text{ cm})}$$

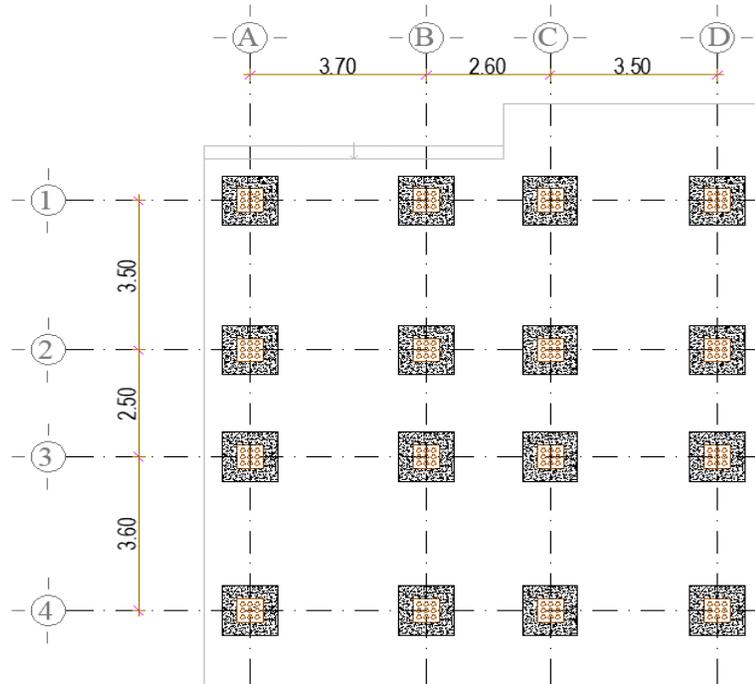
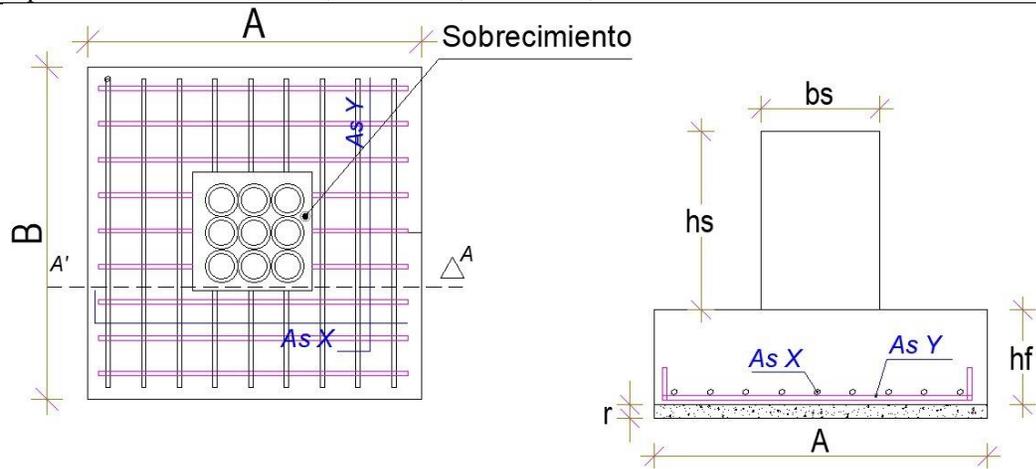
$$As_{ADOPTADO} = 10,17 \text{ cm}^2$$

### 6.6.9.3. Resumen de cimentación

**Tabla 113**

*Resumen del tipo de cimiento y su armado para la vivienda N°2*

PLINTO	A (m)	B (m)	hf (m)	r (m)	Armadura sentido X-Y
Tipo I	1,40	1,40	0,25	0,075	1 $\phi$ 12mm @15cm
SOBRECIMIENTO	bsA (m)	bsB (m)	hs (m)		
Tipo I	0,50	0,50	1,25		

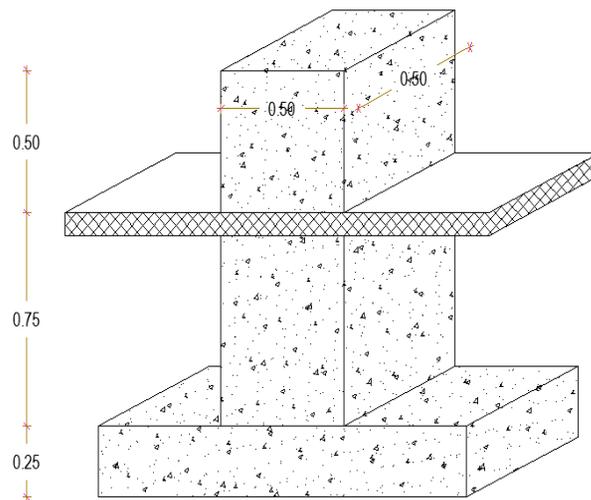


### 6.6.10. Diseño del sobrecimiento (pedestal)

El sobrecimiento será diseñado como una columna corta empotrada en su base y libre en el extremo (ver Figura 191).

#### 6.6.10.1. Control de diseño sobrecimiento

*Paso 1:* Control de esbeltez a través del condicionamiento de la Tabla 84, para lo cual será necesario analizar la geometría del sobrecimiento (ver Figura 149).



**Figura 191.** Geometría del sobrecimiento de la vivienda N°2

Se determina el radio de giro del elemento:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

$$r = \frac{0,50}{\sqrt{12}} = 0,1443 \text{ m}$$

Se evalúa el modelo

$$L_{ef} = 0,75 + 0,50 \text{ m} = 1,25 \text{ m}$$

$$k = 2$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{k * Lef}{r} &\leq 22 \\ \therefore \frac{2 * 1,25}{0,1443} &\leq 22 \\ \therefore 17,325 &\leq 22 \quad \text{CUMPLE} \end{aligned}$$

**Paso 2:** Determinación de la cuantía longitudinal.

La norma **ACI 318-14 sección 18.7.4.1** indica que la cuantía longitudinal debe ser al menos 0,01 y no exceder 0,06. Sin embargo, en el caso de que se realicen traslapos de todas las varillas, estos límites quedan de la siguiente manera:

$$0,01 \leq \rho \leq 0,03$$

$$\rho = \rho_{min} = 0,01 \text{ (para diseño de sobrecimeinto)}$$

$$A_g = 50 \text{ cm} * 50 \text{ cm} = 2500 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{A_{sl}}{A_g}$$

$$\rightarrow \rho * A_g = A_{sl}$$

$$0,01 * 2500 = 25 \text{ cm}^2$$

**Paso 3:** Espaciamiento

Según el **ACI 18.7.5.3** la separación del refuerzo transversal  $s_o$  no debe exceder el menor valor entre

$$s_o \leq \begin{cases} a) \frac{1}{4} \text{ dimensión menor de columna (b)} \\ b) 6 * \phi \text{ (menor varilla de refuerzo longitudinal)} \\ c) s_o = 100 + \left( \frac{350 - h_x}{3} \right) ; 100 \leq s_o \leq 150 \text{ mm} ; h_x \end{cases}$$

$b$  = Es la dimensión menor de la columna,

$\emptyset$  = Es el diámetro de la menor barra de refuerzo longitudinal

$s_0$  = No debe ser mayor a 150 mm ni menor a 100 mm

$h_x$  = Es el espaciamiento máximo, medido centro a centro en mm, entre barras longitudinales soportadas por estribos o ganchos.

$$s_0 \leq \begin{cases} a) \frac{1}{4} * 50 = 12,50 \text{ cm} \\ b) 6 * \emptyset 16 = 9.6 \text{ cm} \\ c) 100 \leq s_0 \leq 150 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow \text{Asumo } s_0 = 10 \text{ cm}$$

$\therefore$  Armadura longitudinal **8  $\emptyset 16$  mm**

**Paso 4:** Diseño de estribos por confinamiento (Ash):

El área total del refuerzo transversal colocado dentro del espaciamiento  $s$  (medido en  $\text{cm}^2$ ) no puede ser menor que ninguna de las siguientes ecuaciones ACI 18.7.5.4:

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} \geq \left[ 0,3 \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} ; 0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}} \right]$$

$b_c$  = : Es la dimensión del núcleo, perpendicular a las ramas del estribo cerrado de confinamiento que conforman  $A_{sh}$

$$b_c = b - \text{recubrimiento} - \emptyset \text{ transversal} = 50 - 3 - 3 - 1 = \mathbf{43 \text{ cm}}$$

$A_{ch}$  = Es el área del núcleo de hormigón

$f_{yt}$  = Es el esfuerzo de fluencia del acero de los estribos. Finalmente, el núcleo de hormigón es el área delimitada por los bordes externos del estribo.

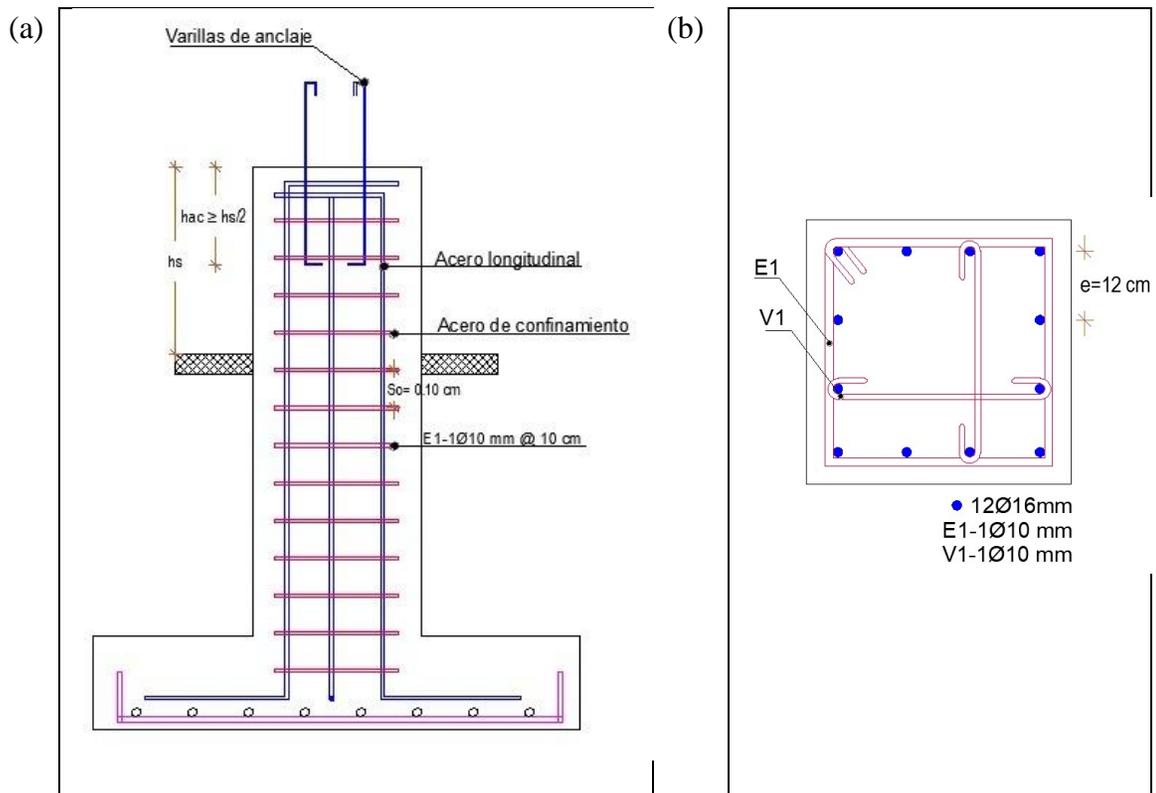
$A_{sh}$  = Debe calcularse para las dos direcciones definidas por los lados de la columna.

$$A_{sh1} = 0,3 \frac{10 * 43 * 210}{4200} \left[ \left( \frac{50 * 50}{43 * 43} \right) - 1 \right] ; A_{sh2} = \frac{0,09 * 10 * 43 * 210}{4200}$$

$$A_{sh} \geq A_{sh1}; A_{sh2}$$

$$A_{sh} = 2,27 \rightarrow 3 \text{ } \phi 10 \text{ mm En ambos sentidos x; y}$$

### 6.6.10.2. Resumen de sobrecimiento



**Figura 192.** Armado del sobrecimiento de la vivienda N°2  
(a) corte longitudinal y (b) corte transversal

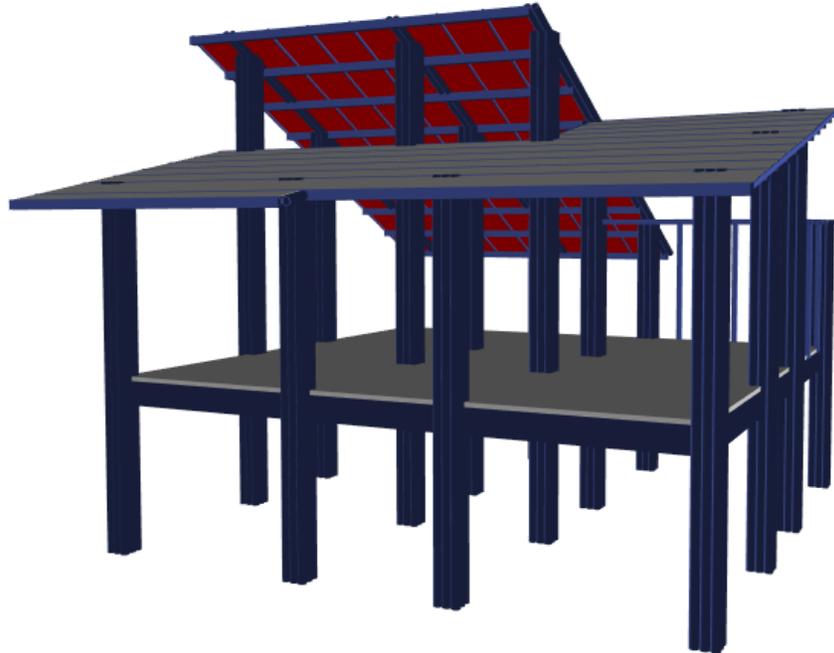
#### **6.6.11. Análisis estructural completo a través del modelamiento en Etabs**

La vivienda está conformada en una estructura no regular de dos plantas, con dos tipos de cubierta (1 y 2 caídas). La estructura principal es de bambú, con pórticos conformados de columnas de 9 culmos con estructura de cubierta con madera y teja española. Inicialmente fue considerada la implementación de paneles estructurales tipo sándwich, sin embargo su aplicabilidad dependerá del criterio constructivo y económico. La cimentación de la estructura está constituida por zapatas aisladas de 1,50 m de lado, desplantadas a 1,00 m de profundidad, con una capacidad portante de 7 Tn/m<sup>2</sup>.

El modelamiento de la estructura completa se realizó a través del programa Etabs para corroborar la funcionalidad de todos los elementos estructurales y consecuentemente analizar su comportamiento en conjunto, ya que si bien es importante el correcto diseño éstos elementos que conforman la vivienda, también es pertinente modelar su acción dentro del campo constructivo ante posibles eventos críticos.

El modelamiento se lo realizó bajo la Norma Ecuatoriana de la Construcción Estructuras de Guadúa - GaK (NEC-SE-GUADÚA, 2016), en la cual se establece los parámetros de análisis que necesitan las estructuras de bambú empezando por el periodo de vibración, distribución de fuerzas laterales en las direcciones (X - Y), cargas, combinaciones de cargas, derivas de piso y deformaciones ante las fuerzas más críticas como las sísmicas. En la Figura 193 se puede visualizar en 3D el modelamiento estructural listo para ser cargado y analizado. La estructura utilizó las mismas cargas y combinaciones de cargas del

modelamiento Etabs de la vivienda N°1 establecidas en la Tabla 85 y Tabla 86 respectivamente.



**Figura 193.** Modelamiento estructural 3D en Etabs para la vivienda N°2-prototipo particular

#### 6.6.11.1. Análisis de participación modal

Bajo los mismos parámetros de análisis utilizados en el modelo estructural de la vivienda N°1, se chequeó la participación modal de este modelo estructural (ver sección 6.5.8.1), obteniendo como resultado lo siguiente:

$$Tm_i = C_t * h_n^\alpha$$

$$Tm_1 \leq Ta \leq Tm_2$$

$$C_t = 0,055$$

$$\alpha = 0,9$$

$$Tm_1 = 0,055 * 9,30^{0,9}$$

$$Tm_1 = 0,409$$

$$Tm_2 = 0,532$$

$$T_a = 0,339 \quad 1^\circ \text{ Modo}$$

$$T_a = 0,317 \quad 2^\circ \text{ Modo}$$

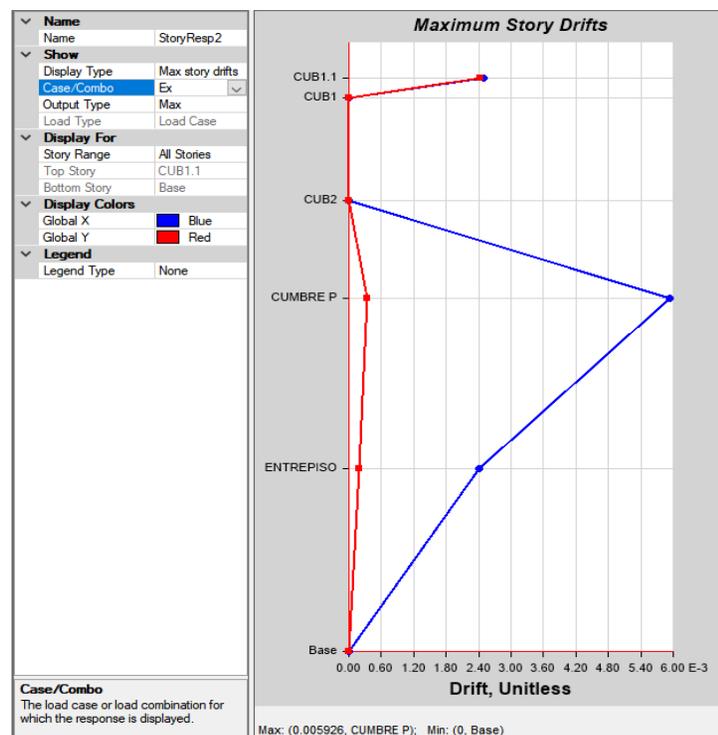
$$T_{m1}(\text{Rígido}) \leq T_a \leq T_{m2}(\text{Flexible})$$

$$0,31 \leq 0,409 \quad 1^\circ \text{ Modo Estructura rígida, se asume el valor teórico } T_{m2}$$

$$0,33 \leq 0,409 \quad 2^\circ \text{ Modo Estructura rígida, se asume el valor teórico } T_{m2}$$

### 6.6.11.2. Control de deformaciones

Para este control es necesario conocer los límites permisibles de las derivas de piso, tal como lo indica la Tabla 88. En las Figuras 194 y 195 se pueden observar las derivas de piso provocadas por la carga sísmica estática Ex y Ey. Las derivas de piso se calcularán de igual manera con la Ecuación (34).



**Figura 194.** Máximas derivas de piso para el sismo estático Ex

$$\Delta E = 0,005926$$

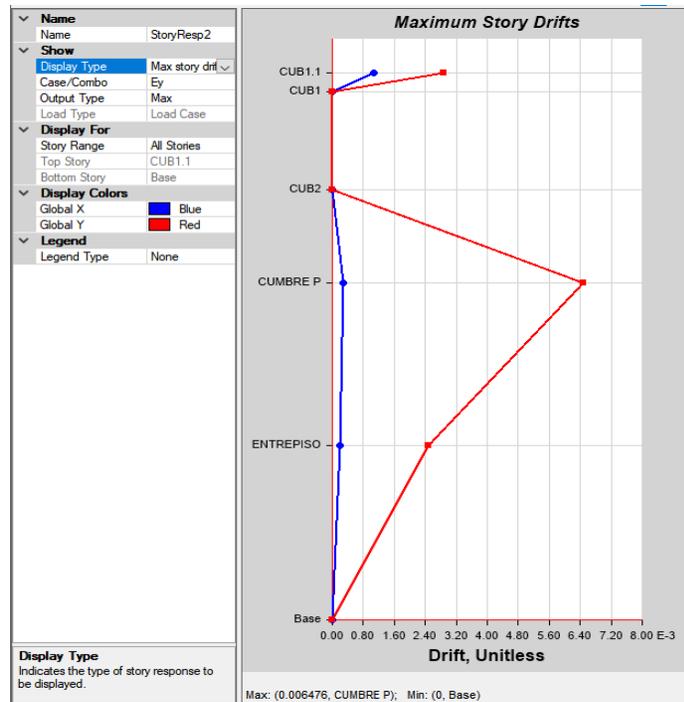
$$\Delta M = 0,75 * R * \Delta E$$

$$\Delta M = 0,75 * 2 * 0,005926$$

$$\Delta M = 0,008894$$

$$\Delta M < \Delta M \text{ máx}$$

$$\Delta M = 0,0085 < \Delta M \text{ máx} = 0,02 \text{ CUMPLE}$$



**Figura 195.** Máximas derivas de piso para el sismo estático Ey

$$\Delta E = 0,006342$$

$$\Delta M = 0,75 * R * \Delta E$$

$$\Delta M = 0,75 * 2 * 0,006342$$

$$\Delta M = 0,009513$$

$$\Delta M < \Delta M \text{ máx}$$

$$\Delta M = 0,009513 < \Delta M \text{ máx} = 0,02 \text{ CUMPLE}$$

En cuanto a los desplazamientos, las Figuras 196 y 197 muestran que en la dirección X la estructura se desplazó **2,55 cm** mientras que en la dirección Y fue de **2,83cm**.

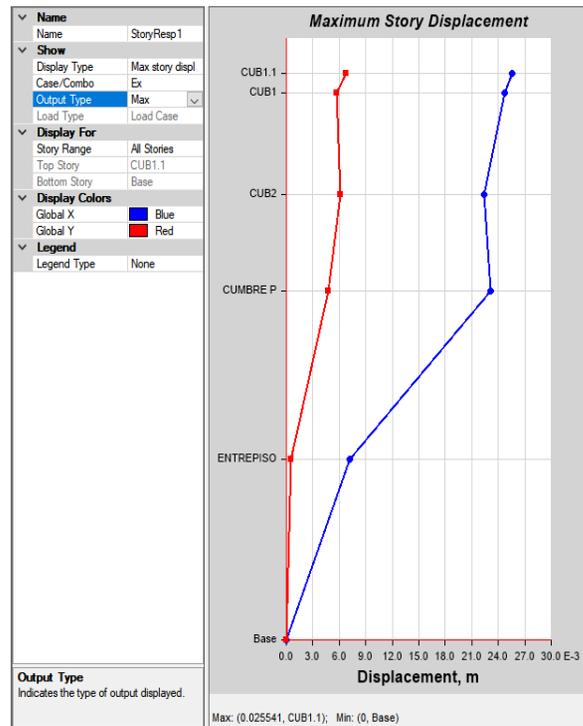


Figura 196. Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ex

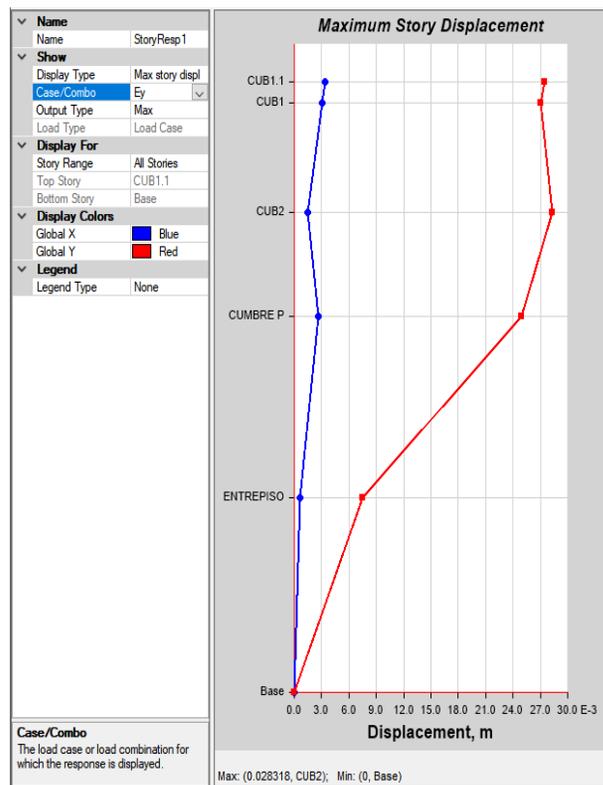


Figura 197. Desplazamiento de la estructura en el sismo estático Ey

### 6.6.11.3. Control de masas permanentes y sísmicas

Chequeo de la “Lista de Materiales por Piso”, bajo el mismo concepto que en la vivienda N°1 (ver Tabla 114).

**Tabla 114**

*Lista de Materiales por nivel de la vivienda N°2*

Story	Element Type	Material	Total Weight	# Pieces
CUB1.1	Beam	MADERA-TA(ROBLE)	0,16013	8
CUB1.1	Brace	D.ASPER	0,02075	3
CUB1.1	Brace	MADERA-TC (CEDRO)	0,01031	6
CUB1.1	Wall	HOJA DE TEJA	0,04684	
CUB1	Column	D.ASPER	2,1209	7
CUB1	Beam	D.ASPER	0,01407	3
CUB1	Beam	MADERA-TA(ROBLE)	0,81411	42
CUB1	Beam	MADERA-TC (CEDRO)	0,01133	12
CUB1	Brace	D.ASPER	0,09246	16
CUB1	Brace	MADERA-TC (CEDRO)	0,03092	18
CUB1	Wall	HOJA DE TEJA	0,14051	
CUB1	Floor	HOJA DE TEJA	0,04891	
CUB2	Column	D.ASPER	1,83102	9
CUB2	Beam	D.ASPER	0,15115	30
CUB2	Beam	MADERA-TA(ROBLE)	2,46966	125
CUB2	Beam	MADERA-TC (CEDRO)	0,07462	69
CUB2	Brace	D.ASPER	0,08488	10
CUB2	Brace	MADERA-TC (CEDRO)	0,03092	18
CUB2	Wall	HOJA DE TEJA	0,14051	
CUB2	Floor	HOJA DE TEJA	0,32911	
CUMBRE P	Column	D.ASPER	0,21095	1
CUMBRE P	Column	MADERA TB(TECA)	0,08434	6
CUMBRE P	Beam	MADERA-TA(ROBLE)	0,34042	17
CUMBRE P	Beam	MADERA TB(TECA)	0,29403	105
CUMBRE P	Brace	D.ASPER	0,02829	3
CUMBRE P	Brace	MADERA-TC (CEDRO)	0,01031	6
CUMBRE P	Wall	HOJA DE TEJA	0,04684	
ENTREPISO	Beam	D.ASPER	0,94077	24
ENTREPISO	Floor	Loseta-H-A=210kg/cm2	27,09504	
SUM	Column	D.ASPER	4,16286	17
SUM	Column	MADERA TB(TECA)	0,08434	6
SUM	Beam	D.ASPER	1,10599	57
SUM	Beam	MADERA-TA(ROBLE)	3,78431	192
SUM	Beam	MADERA-TC (CEDRO)	0,08595	81
SUM	Beam	MADERA TB(TECA)	0,29403	105
SUM	Brace	D.ASPER	0,22638	32
SUM	Brace	MADERA-TC (CEDRO)	0,08245	48
SUM	Wall	HOJA DE TEJA	0,37469	
SUM	Floor	Loseta-H-A=210kg/cm2	27,09504	
SUM	Floor	HOJA DE TEJA	0,37801	
<b>TOTAL</b>	<b>ALL</b>	<b>ALL</b>	<b>37,67405</b>	<b>538</b>

La Tabla 115 por su parte presenta la carga autosísmica provocada por el usuario para simular un evento crítico al que estará expuesta la estructura, indicando el peso adicional que le provoca cuando interviene el sismo estático.

**Tabla 115**

*Auto-sísmica por coeficientes de usuario para la vivienda N°2*

<b>Load Pattern</b>	<b>Type</b>	<b>Direction</b>	<b>Eccentricity</b>	<b>C</b>	<b>K</b>	<b>Weight Used</b>	<b>Base Shear</b>
			%			tonf	tonf
Ex	Seismic	X		0,4305	0,8655	69,8973	30,0908
Ex	Seismic	X + Ecc. Y	5	0,4305	0,8655	69,8973	30,0908
Ex	Seismic	X - Ecc. Y	5	0,4305	0,8655	69,8973	30,0908
Ey	Seismic	Y		0,431	0,8625	69,8973	30,1257
Ey	Seismic	Y + Ecc. X	5	0,431	0,8625	69,8973	30,1257
Ey	Seismic	Y - Ecc. X	5	0,431	0,8625	<b>69,8973</b>	30,1257

El control para esta sección es verificar que el peso total sísmico de la Tabla 115 sea mayor que el peso total de la estructura completa (ver Tabla 114), de esta manera se confirma que la estructura se ha diseñado correctamente, y por tanto sus valores de respuesta tienen datos bastante aproximados a la realidad.

Tabla 114 = **37,674 Tnf** < Tabla 115 = **69,897 Tnf** **CUMPLE**

## **CAPÍTULO VII**

### **7. ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS VIVIENDAS N°1 - PROTOTIPO SOCIAL Y N°2 - PROTOTIPO PARTICULAR**

#### **7.1. Introducción**

El presente capítulo se enfocará exclusivamente en el análisis presupuestario de los modelos de viviendas (prototipo social y particular, respectivamente) presentados en el Capítulo VI, desglosando los precios aproximados en el mercado de los materiales utilizados en la construcción, y en su conjunto presentar un precio base de cada vivienda, esto con la finalidad de sustentar la viabilidad del presente proyecto dentro de la industria inmobiliaria y difundir su funcionalidad arquitectónica, alto rendimiento estructural en sus diseños, mínimo impacto ambiental en su construcción y la eficiencia mecánica de los productos no convencionales.

#### **7.2. Elaboración del presupuesto referencial**

Para la elaboración detallada de los costos que tendrían las viviendas propuestas en el presente proyecto, se ha considerado el análisis de precios unitarios de cada uno de los rubros que intervienen en la construcción de ambas viviendas, especificando los materiales de los elementos estructurales, la mano de obra, las instalaciones eléctricas y sanitarias avalados por la Cámara de la Industria de la Construcción y la Contraloría General del Estado; esto con el fin de tener un presupuesto referencial que permita calificar a cada vivienda por su competitividad en el mercado, evaluando su rentabilidad (costo-beneficio), y en base a estos criterios técnicos lograr catapultar las propuestas como referente habitacional en la industria de la construcción, además de suplir el déficit habitacional planteado en esta investigación (ver Tabla 116 y Tabla 117).

**Tabla 116**  
Presupuesto y tiempo referencial de la vivienda N°1 – Prototipo social

No.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	PRECIO GRUPO
<b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>						<b>\$ 518.10</b>
1.00	Limpieza del terreno	m2	200.00	\$ 0.78	\$ 156.00	
2.00	Replanteo y nivelación	m2	170.00	\$ 2.13	\$ 362.10	
<b>CIMENTACIONES</b>						<b>\$ 3,043.51</b>
3.00	Excavación de plintos y cimientos	m3	19.80	\$ 5.66	\$ 112.07	
4.00	Suministro e instalación de plástico bajo el área de cimentación	m2	5.30	\$ 1.05	\$ 5.55	
5.00	Desalojo a máquina	m3	25.74	\$ 7.97	\$ 205.15	
6.00	Desalojo a caretilla (Dis. Máx=30 m)	m3	10.00	\$ 3.54	\$ 35.40	
7.00	Relleno con material de mejoramiento	m3	1.80	\$ 16.50	\$ 29.70	
8.00	Hormigón simple en plintos (sin encofrados) F'c=210 kg/cm2	m3	3.15	\$ 124.74	\$ 392.93	
9.00	Replantes H.S. 140 kg/cm2	m3	1.35	\$ 89.03	\$ 120.19	
10.00	Hormigón simple en sobrecimientos	m3	1.73	\$ 118.80	\$ 205.29	
11.00	Contrapiso H.S.180 kg/cm2	m3	8.15	\$ 13.24	\$ 107.87	
12.00	Acero de refuerzo	kg	1095.43	\$ 1.67	\$ 1,829.37	
<b>ESTRUCTURA</b>						<b>\$ 791.30</b>
13.00	Columna de bambú 4 culmos previamente tratados (CH<17%)	ml	216.00	\$ 0.72	\$ 155.52	
14.00	Soleras inferiores de D.asper (De=14 cm)	ml	45.76	\$ 0.72	\$ 32.95	
15.00	Soleras superiores de D.asper (De=14 cm)	ml	45.76	\$ 0.72	\$ 32.95	
16.00	Varillas de hierro de 12 mm para anclaje columna-cimentación	ml	62.64	\$ 1.16	\$ 72.66	
17.00	Mortero en uniones perforadas cemento/arena (1:4)	m3	0.55	\$ 116.87	\$ 63.97	
18.00	Abrazaderas de acero inoxidable (columnas)	ml	66.53	\$ 6.18	\$ 411.22	
19.00	Pernos de anclaje acero inoxidable 0.9 mm	u	144.00	\$ 0.15	\$ 22.03	
<b>ENTRAMADOS</b>						<b>\$ 2,382.41</b>
20.00	Riostras, pies derechos	ml	183.10	\$ 0.72	\$ 131.83	
21.00	Pared con esterilla de D. asper incluye estructura	m2	42.52	\$ 22.73	\$ 966.48	
22.00	Enlucido liso exterior	m2	42.52	\$ 7.70	\$ 327.40	
23.00	Suministro y pintado interior mas empaste	m2	42.52	\$ 8.98	\$ 381.83	
24.00	Suministro y pintado exterior mas empaste	m2	42.52	\$ 13.52	\$ 574.87	
<b>CUBIERTA</b>						<b>\$ 1,904.50</b>
25.00	Estructura celosía de D. asper	ml	450.18	\$ 0.72	\$ 324.13	
26.00	Correas de D.asper	ml	163.35	\$ 0.60	\$ 98.01	
27.00	Esterilla de D.asper	m2	151.41	\$ 2.07	\$ 313.42	
28.00	Mortero (4-3 cm)	m3	6.06	\$ 3.51	\$ 21.26	
29.00	Suministro e instalación de membrana asfáltica	m2	151.41	\$ 7.58	\$ 1,147.69	
<b>PISOS</b>						<b>\$ 891.43</b>
30.00	Masillado de pisos	m2	83.36	\$ 7.34	\$ 611.89	
31.00	Piso baño, lavandería cocina	m2	18.64	\$ 15.00	\$ 279.54	
<b>CARPINTERÍA</b>						<b>\$ 1,284.00</b>
32.00	Puertas principales con accesorios 2.10x1.20	u	1.00	\$ 180.00	\$ 180.00	
33.00	Puertas MDF dormitorio con accesorios 2.00x1.00	u	3.00	\$ 138.00	\$ 414.00	
34.00	Puertas MDF baño con accesorios 1.90x0.80	u	3.00	\$ 110.00	\$ 330.00	
35.00	Puertas corredizas con accesorios	u	2.00	\$ 180.00	\$ 360.00	
<b>VENTANAS</b>						<b>\$ 3,921.93</b>
36.00	Ventanas corredizas de aluminio y vidrio con accesorios	m2	4.78	\$ 84.35	\$ 403.20	
37.00	Ventanas fijas de aluminio y vidrio con accesorios	m2	45.44	\$ 77.44	\$ 3,518.73	
<b>INSTALACIONES HIDROSANITARIAS</b>						<b>\$ 2,829.60</b>
38.00	Caja de registro. AA.SS. 60x60x40cm. Tapa H.S. y enlucido interior	pto.	3.00	\$ 94.50	\$ 283.50	
39.00	Puntos de agua potable Ø 1/2"	pto.	11.00	\$ 25.59	\$ 281.49	
40.00	Puntos de aguas servidas Ø 50mm	pto.	6.00	\$ 45.19	\$ 271.14	
41.00	Puntos de aguas servidas Ø 110mm	pto.	5.00	\$ 48.49	\$ 242.45	
42.00	Suministro e instalación de tubería PVC presión roscable Ø1/2".	m	48.15	\$ 9.35	\$ 450.20	
43.00	Suministro e instalación de tubería PVC desagüe Ø50mm.	m	8.45	\$ 18.03	\$ 152.35	
44.00	Suministro e instalación de tubería PVC desagüe Ø110mm.	m	19.79	\$ 11.30	\$ 223.63	
45.00	Bajante de tubería PVC desagüe Ø110mm.	m	24.19	\$ 13.02	\$ 314.95	
46.00	Suministro e instalación de lavamano, tubería de abasto, desagüe y grifería	pto.	4.00	\$ 73.35	\$ 293.40	
47.00	Suministro e instalación de inodoro y tubería de abasto.	pto.	3.00	\$ 93.20	\$ 279.60	
48.00	Suministro e instalación de ducha, llave y rejilla.	pto.	2.00	\$ 18.44	\$ 36.88	
<b>INSTALACIONES ELECTRICAS</b>						<b>\$ 1,311.24</b>
49.00	Suministro e instalación de acometida eléctrica externa	m	7.00	\$ 6.85	\$ 47.95	
50.00	Punto de iluminación 110V. (tubería EMT)	pto.	19.00	\$ 31.48	\$ 598.12	
51.00	Punto Tomacorriente polarizado de 110 V. (tubería EMT)	pto.	18.00	\$ 28.08	\$ 505.44	
52.00	Puntos de tomacorriente de 220V (tubería EMT)	pto.	2.00	\$ 33.96	\$ 67.92	
53.00	Suministro e instalación de caja de breaker, panel distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 58.05	\$ 58.05	
54.00	Breaker 1P-20A para panel de distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 12.24	\$ 12.24	
55.00	Breaker 2P-30A para panel de distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 21.52	\$ 21.52	
<b>OBRAS EXTERIORES</b>						<b>\$ 906.90</b>
56.00	Revestimiento de piedra decorativa	m2	25.40	\$ 12.00	\$ 304.80	
57.00	Pared ajardinada	m2	6.69	\$ 90.00	\$ 602.10	
<b>COSTO DEL PROYECTO:</b>				<b>\$ 19,784.92</b>		
<b>TIEMPO ESTIMADO:</b>				<b>22-DÍAS</b>		

**Tabla 117**  
**Presupuesto y tiempo referencial de la vivienda N°2 – Prototipo particular**

Nº.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	PRECIO GRUPO	
<b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>							
1	Limpieza del terreno	m2	450.00	0.78	\$ 351.00	\$ 1,416.00	
2	Replanteo y nivelación	m2	500.00	2.13	\$ 1,065.00		
<b>CIMENTACIONES</b>							
3	Excavación de pilotos y cimientos	m3	34.50	5.66	\$ 195.25	\$ 6,122.72	
4	Suministro e instalación de plástico bajo el área de cimentación	m2	9.74	1.05	\$ 10.20		
5	Desalajo a máquina	m3	44.84	7.97	\$ 357.41		
6	Relleno con material de mejoramiento	m3	3.14	16.50	\$ 51.74		
7	Replentidos H.S. 140 kg/cm2	m3	2.35	89.03	\$ 209.40		
8	Hormigón simple en pilotos (sin encofrados) F'c=210 kg/cm2	m3	5.49	118.80	\$ 651.97		
9	Hormigón simple en sobrecimientos	m3	5.40	124.74	\$ 673.60		
10	Contrapiso H.S.180 kg/cm2	m3	98.59	13.24	\$ 1,305.32		
11	Acero de refuerzo	kg	1479.17	1.80	\$ 2,667.83		
<b>ESTRUCTURA</b>							
12	Columna de D. asper 9 culmos previamente tratados (CH<17%)	ml	1029.96	1.20	\$ 1,235.95	\$ 2,968.60	
13	Varillas de hierro de 12 mm para anclaje columna-cimentación	ml	129.60	1.25	\$ 162.36		
14	Mortero en uniones perforadas (columnas) cemento/arena (1:4)	m3	0.68	116.87	\$ 79.30		
15	Abrazaderas anclaje acero inoxidable (columnas)	ml	88.70	6.18	\$ 548.30		
16	Pernos de anclaje acero inoxidable 0.9 mm	u	192.00	0.15	\$ 29.38		
17	Vigas de D.asper 3 culmos previamente tratados (CH<17%)	ml	232.80	1.20	\$ 279.36		
18	Abrazaderas anclaje acero inoxidable (columnas)	ml	88.70	6.18	\$ 548.30		
19	Pernos de anclaje acero inoxidable 0.9 mm	u	72.00	0.15	\$ 11.02		
20	Mortero en uniones perforadas (vigas) cemento/arena (1:4)	m3	0.64	116.87	\$ 74.63		
<b>ENTREPISO</b>							
21	Acero de refuerzo	kg	1538.29	1.67	\$ 2,568.94	\$ 5,859.82	
22	Losa maciza de hormigón armado e=12 cm	m3	1.18	38.71	\$ 45.80		
23	Suministro e instalación de lámina impermeabilizante	m2	98.59	8.28	\$ 816.32		
24	Suministro y pintado interior mas empaste	m2	98.59	8.98	\$ 885.33		
25	Suministro e instalación de terraza ajardinada	m2	12.77	120.83	\$ 1,543.43		
<b>ESCALERA</b>							
26	Viga de madera (zanca) 0.24x0.09 m	ml	20.84	13.68	\$ 285.09	\$ 732.79	
27	Tablón fino 0.30 x 0.05 cm cepillado, instalado y lacado	m2	8.06	17.10	\$ 137.83		
28	Suministro e instalación de cristal templado claro de 10 mm	m2	6.82	24.56	\$ 167.47		
29	Tubo redondo galvanizado O 2 " x 1.5	m2	6.82	20.88	\$ 142.40		
<b>PAREDES</b>							
30	Tableros tipo sandwich exterior (bambú balsa) e= 124 mm	m2	198.60	91.59	\$ 18,188.98	\$ 33,171.04	
31	Tableros tipo sandwich interior (bambú balsa) e= 74 mm	m2	133.15	67.37	\$ 8,969.92		
32	Suministro y pintado interior	m2	198.60	9.80	\$ 1,946.28		
33	Suministro y pintado exterior	m2	133.15	19.26	\$ 2,564.47		
34	Pernos de anclaje y accesorios	u	1533.60	0.98	\$ 1,501.39		
<b>CUBIERTA</b>							
35	Vigas de D. asper 2 culmos previamente tratados (CH<17%)	ml	45.63	0.69	\$ 31.48	\$ 5,980.97	
36	Viguetas de madera (0.16x0.16)m	ml	111.28	13.68	\$ 1,522.31		
37	Correas de madera (0.04x0.08) m	ml	135.68	4.56	\$ 618.70		
38	Suministro e instalación de paneles de teja española 1.34x1.20x0.055 m	m2	129.54	29.40	\$ 3,808.48		
<b>PISOS</b>							
39	Piso de madera (enlucado)	m2	176.18	25.00	\$ 4,404.50	\$ 5,324.48	
40	Piso baño, lavandería cocina	m2	40.82	22.54	\$ 919.98		
<b>CARPINTERÍA</b>							
41	Puertas principales con accesorios 2.10x1.50 m	u	1.00	217.22	\$ 217.22	\$ 2,277.22	
42	Puertas MDF dormitorio con accesorios 2.00x1.00 m	u	5.00	138.00	\$ 690.00		
43	Puertas MDF baño con accesorios 1.90x0.90 m	u	3.00	110.00	\$ 330.00		
44	Puertas corrediza con accesorios (aluminio-vidrio) 1.40x1.80 m	u	4.00	260.00	\$ 1,040.00		
<b>VENTANAS</b>							
45	Ventanas corredizas de aluminio y vidrio con accesorios	m2	11.26	84.35	\$ 949.79	\$ 3,621.36	
46	Ventanas fijas de aluminio y vidrio con accesorios	m2	34.50	77.44	\$ 2,671.57		
<b>INSTALACIONES HIDROSANITARIAS</b>							
47	Caja de registro. A.A.S.S. 60x60x40cm. Tapa H.S. y enlucido interior	pto.	4.00	94.50	\$ 378.00	\$ 4,134.10	
48	Puntos de agua potable Ø 1/2"	pto.	13.00	25.59	\$ 332.67		
49	Puntos de aguas servidas Ø 50mm	pto.	10.00	45.19	\$ 451.90		
50	Puntos de aguas servidas Ø 110mm	pto.	14.00	48.49	\$ 678.86		
51	Suministro e instalación de tubería PVC presión roscable Ø1/2".	m	54.61	9.35	\$ 510.60		
52	Suministro e instalación de tubería PVC desagüe Ø50mm.	m	9.70	18.03	\$ 174.89		
53	Suministro e instalación de tubería PVC desagüe Ø110mm.	m	59.17	11.30	\$ 442.62		
54	Bajante de tubería PVC desagüe Ø110mm.	m	31.90	13.02	\$ 415.34		
55	Suministro e instalación de lavamanos, tubería de abasto, desagüe y grifería	pto.	5.00	73.35	\$ 366.75		
56	Suministro e instalación de inodoro y tubería de abasto.	pto.	3.00	93.20	\$ 279.60		
57	Suministro e instalación de ducha, llave y rejilla.	pto.	2.00	18.44	\$ 36.88		
58	Suministro e instalación de lavaplatos	pto.	1.00	65.99	\$ 65.99		
<b>INSTALACIONES ELECTRICAS</b>							
59	Suministro e instalación de acometida eléctrica externa	m	72.00	\$ 6.85	\$ 493.20	\$ 2,103.65	
60	Punto de iluminación 110V. (tubería EMT)	pto.	22.00	\$ 31.48	\$ 692.56		
61	Punto Tomacorriente polarizado de 110 V. (tubería EMT)	pto.	27.00	\$ 28.08	\$ 758.16		
62	Puntos de tomacorriente de 220V (tubería EMT)	pto.	2.00	\$ 33.96	\$ 67.92		
63	Suministro e instalación de caja de breaker, panel distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 58.05	\$ 58.05		
64	Breaker 1P-20A para panel de distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 12.24	\$ 12.24		
65	Breaker 2P-30A para panel de distribución 8 espacios	u	1.00	\$ 21.52	\$ 21.52		
<b>OBRAS EXTERIORES</b>							
66	Pared ajardinada	m2	23.15	\$ 90.00	\$ 2,083.50	\$ 2,083.50	
					<b>COSTO DEL PROYECTO:</b>	<b>\$ 75,796.25</b>	
					<b>TIEMPO ESTIMADO:</b>	<b>35-DÍAS</b>	

### 7.3. Análisis de tiempos de obra

El tiempo de construcción de una vivienda representa un factor sumamente importante para destacar su productividad económica. El bambú al ser un elemento altamente flexible y liviano (en comparación con los materiales convencionales de construcción), permite que la elaboración estructural sea más fácil de armar con la técnica apropiada, y consecuentemente el montaje de éstas tarde menos tiempo en su colocación. El Anexo 13 y el Anexo 14 presentan el “cronograma valorado de obra” para las viviendas social y particular, respectivamente, detallando el tiempo que implica la construcción de cimentaciones, columnas, vigas y cubiertas, además de instalaciones eléctricas y sanitarias.

La vivienda N° 1 – Prototipo social terminado en un tiempo aproximado de **22 días**.

La vivienda N° 2 – Prototipo particular terminado en un tiempo aproximado de **35 días**.

### 7.4. Comparación con viviendas convencionales de características similares

**Tabla 118**

*Comparación de viviendas propuestas con D. asper con otras de características similares*

Ítem evaluador	Vivienda social D. asper	Vivienda particular D. asper	Vivienda de madera (Anexo 15)	Vivienda de hormigón (Anexo 16)	Otras viviendas de bambú (CONGOPE)
<b>Presupuesto</b>	\$ 19 784,00	\$ 75 796,25	\$ 15 579,00	\$ 34 576,95	\$ 16 688,40
<b>Tiempo de construcción</b>	22 días	35 días	28 días	156 días	30 días
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	102	217	95	80	82
<b>Precio por m<sup>2</sup></b>	\$ 189,88	\$ 349,29	\$ 163,99	\$ 428,25	\$ 203,52

En la Tabla 118 se puede comparar conjuntamente el presupuesto, el tiempo de construcción y el precio por metro cuadrado de viviendas de madera y hormigón con características similares a las viviendas de bambú propuestas. En cuanto a coste-beneficio, los proyectos de vivienda con *D. asper* son altamente competitivos (e inclusive más económicos) con los precios que se ofertan en

las entidades públicas y privadas; destacando que, la vivienda de madera es un 13% menor en su precio por metro cuadrado, mientras que la de hormigón alcanza un valor de aproximadamente 55% más costosa. El tiempo de construcción de las viviendas con *D. asper* se reduce en promedio un 21% y 85% con respecto a las viviendas de madera y hormigón, respectivamente.

Adicionalmente se ha comparado la vivienda de carácter social de la actual investigación con una vivienda de caña guadua construida en Manabí-Ecuador, destacando una similitud del 90% en cuanto a costo por metro cuadrado, y del 75% en base a tiempos de construcción, sin embargo, en ambos casos la vivienda de *D. asper* presenta menor costo y tiempo de construcción.

## **7.5. Ventajas y desventajas**

### **Ventajas**

- El *D. asper* se considera una planta autosustentable por su gran capacidad de adaptabilidad dentro del ecosistema en el que se encuentre, logrando un acelerado crecimiento y regeneración casi inmediata. Además, su potencial innato le permite solucionar problemas ambientales y mejorar el suelo donde se asienta, evita la erosión y estabiliza el nivel freático de su entorno.
- Las propiedades físico-mecánicas evaluadas en el *D. asper* de la presente investigación, destacaron a este biomaterial como un excelente y mejorado sustituto para los elementos estructurales de la industria de la construcción, por su gran flexibilidad ante los esfuerzos perpendiculares a las fibras, pero también su excelente rigidez ante esfuerzos compresivos; adicionalmente se reafirmó su excelencia biomecánica mediante su ductilidad

característica, la cual permitía al material reacomodar su estructura fibrovascular ante los esfuerzos externos y tener un rango de soporte amplio antes del colapso.

- La funcionalidad mecánica de los elementos a base de *D. asper* es excelente, ya que se ha comparado su respuesta ante fuerzas estáticas y dinámicas es más óptima que los elementos convencionales de acero y hormigón, lo que ha provocado constituir un análisis biomecánico exhaustivo a fin de aprovechar todas sus capacidades innatas.
- Los elementos compuestos por *D. asper* son totalmente renovables y ecológicos, es decir, causan un mínimo impacto ambiental en su consumo de energía en obra; además de ser una de las especies vegetales que más capturan CO<sub>2</sub> durante toda su etapa de desarrollo, aminorando la huella de carbono que desgasta al planeta.
- En cuanto a coste-beneficio, el *D. asper* ha competido con los estándares arquitectónicos y estructurales de una vivienda común, y sin embargo, su inversión es relativamente baja, lo cual permite catapultar al material a una posible industrialización inmobiliaria con grandes innovaciones estructurales y seguridad sismorresistente.
- El tiempo que toma la construcción con bambú es corto, ya que al ser un biomaterial flexible y liviano, permite un manejo más rápido y eficiente durante el montaje y armado de estructuras, ventaja que se refleja en el coste final de producción.

### **Desventajas**

- El bambú es considerado un recurso bastante aprovechable, sin embargo, el desconocimiento de sus potenciales físicos y mecánicos no ha permitido lograr una industrialización masiva del producto, subestimando las bondades que lograría tener en la construcción.

- El equilibrio higroscópico que posee esta planta leñosa, la hace muy susceptible al embate contra las condiciones medioambientales durante su uso como producto.
- Las condiciones de sitio, el estado de madurez y el contenido de humedad son factores que incurren fuertemente en el comportamiento físico-mecánico de toda la estructura del bambú.
- La mano de obra que requiere la producción de elementos de bambú es escasa debido a que no se han desarrollado capacitaciones constantes en cuanto a los tipos de tratamiento y las formas más eficientes de uso constructivo que requiere este material.
- Se requiere una total atención en las uniones de los elementos ya que será un punto clave de resistencia y de funcionalidad estructural en los elementos portantes de una vivienda.

## 7.6. Maquetas arquitectónicas



*Figura 198.* Fotografías de la maqueta arquitectónica de la Vivienda N°1 – Prototipo social



*Figura 199.* Fotografías de la maqueta arquitectónica de la Vivienda N°2 – Prototipo particular

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGS-X. (2013). *Series Shimadzu Corporation Precision Universal Tester Autograph*.
- Akinlabi, E. T., Anane-Fenin, K., & Akwada, D. R. (2017). *Current Trend in Bamboo Analysis Bamboo* (pp. 221-235): Springer.
- Amatosa Jr, T. A., & Loretero, M. E. (2016). *Global Journal of Engineering and Technology Review. Global Journal of Engineering and Technology Review, Vol: 1,(Número: 1), 114-121. ISSN:0128-2905*
- Anink, D., Boonstra, C., & Mak, J. (1996). *Handbook of sustainable building (revised, illustrated ed.)*. London: Earthscan Publications Ltd., ISBN:9781873936382
- Añazco, M., & Rojas, S. (2015). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie Guadua angustifolia (A. Soria Ed. Red Internacional de Bambú y Ratán, INBAR ed. Vol. 1)*. Quito, Ecuador: Andrade, Carlos Alberto,
- Araujo Espinoza, D. L. (2015). *Propagación vegetativa de Dendrocalamus asper (Schult. Schult. f.) Backer ex K. Heyne y Guadua angustifolia Kunth establecidas en campo definitivo, Tulumayo-Tingo María. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tulumayo, Peru, Recursos Naturales Renovables, Número de Documento: T.FRS-242, <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/632>*
- Armendáriz, C., Vinicio, F., Álvarez, T., & Aníbal, J. (2011). *Cálculo y diseño estructural para la cubierta del Mercado Central de la Parroquia de Píntag en base a tenso-estructuras con el uso de bambú gigante (dendrocalamus asper). (Bachelor Thesis), ESPE/2011, Sangolquí, Ecuador, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Número de Documento: 031072, <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/3175>*
- Ashby, M. F. (1995). *Materials selection in mechanical design. MRS Bull*, Vol: 30,(Número: 12), 995.
- Ashby, M. F., & Cebon, D. (1993). *Materials selection in mechanical design. Le Journal de Physique IV*, Vol: 3,(Número: C7), C7-1-C7-9. ISSN:1155-4339
- ASTM D2395. (2014). *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. Pennsylvania, United States: ASTM International West Conshohocken*
- Awalluddin, D., Ariffin, M. A., Osman, M. H., Hussin, M. W., Ismail, M. A., Lee, H.-S., & Lim, N. H. A. S. (2017). *Mechanical properties of different bamboo species. 138, 01024, Paper presentado en la MATEC Web of Conferences, ISBN:2261-236X*

- Beatley, T., & Newman, P. (2012). *Green urbanism down under: Learning from sustainable communities in Australia*. Washington, DC [u.a.]: Island Press, ISBN:1597268623
- Benito Muñoz, J. J., Álvarez Cabal, R., & Ureña Prieto, F. (2008). *Saleta Casino E., Aranda Ortega E.(2014) (Universidad Nacional de Educación a Distancia Ed.)*, ISBN:9788436268874
- Bonilla Jiménez, W. M., Terán Herrera, H. C., & Reinoso Peñaherrera, H. R. (2017). *Mecánica para ingeniería estática: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*.
- Bounsong, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P., & Ratcharoen, W. (2013). *Physical and Mechanical Properties of Some Thai Bamboos for House Construction (Project PD 372/05). Forest Research and Development Bureau, Royal Forest Department, Bangkok, Thailand, Vol,(Número 1)*.
- Bystriakova, N., Kapos, V., Lysenko, I., & Stapleton, C. (2003). *Distribution and conservation status of forest bamboo biodiversity in the Asia-Pacific Region. Biodiversity & Conservation*, Vol: 12,(Número: 9), 1833-1841. ISSN:0960-3115
- Cabello, F. J. A. (2008). *Los materiales de construcción y el medio ambiente. Ecosostenible*, Vol,(Número: 41), 30-37. ISSN:1699-3942
- Carmirol Umaña, V. (2009). *Bambú Guadua: un recurso ecológico. Tecnología en Marcha*, Vol: XXII,(Número: 3), 3-9. ISSN:0379-39822215-3241
- Carrillo, J., & Alcocer, S. (2012). *Revisión de criterios de sostenibilidad en muros de concreto para viviendas sismorresistentes. Ingeniería, investigación y tecnología*, Vol: 13,(Número: 4), 479-487. ISSN:1405-7743
- Carrión, A., Giunta, I., Mancero, A., & Jiménez, G. (2017). *Posterremoto, gestión de riesgos y cooperación internacional (M. R. Flores Ed. PNUD/ECHO ed. Vol. 1)*. Quito, Ecuador: V&M Gráficas, ISBN:978-9942-29-014-4
- Castaño Nieto, F., & Moreno Orjuela, R. (2002). *El Manual Silvicultural de la Guadúa (Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia-Area Piloto Eje Cafetero-Tolima y Valle del Cauca Ed. Vol. 1)*. Colombia, Tolima y Valle del Cauca, ISBN:1401054536
- Castaños, C. M. (1993). *Horticultura: manejo simplificado*, ISBN:9688842435
- Castrillón, B., & Malaver, D. (2004). *Procedimiento de ensayos para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua. Trabajo de Grado Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá*, Vol,(Número, 127).
- Cembellín, B. H. (2009). *Acero Vegetal: El Bambú. Cercha: revista de los aparejadores y arquitectos técnicos*, Vol,(Número: 102), 76-79. ISSN:2484-1048
- Climate-Data. (2015). *Climate data for cities worldwide*. [climate-data.org](http://climate-data.org)

- Contreras, J. S., & Díaz, G. (1997). *Inmunización de la guadua. Ingeniería e Investigación*, Vol,(Número: 38), 14-20. ISSN:2248-8723
- Costa-Solís, M. (1960). *Bambúes y Pseudobambúes Económicos del Ecuador. Ecuador: Editorial Universitaria*, ISBN:3113644
- Coto, J. M. (1991). *Características generales del bambú y sistemas de cultivo*. Vol,(Número. ISSN:0257-1625
- Cype, I. (2013). *Cype Ingenieros database, v. 2014. c ed. Cype Ingenieros SA: Spain*, Vol,(Número.
- De Borst, R., Crisfield, M. A., Remmers, J. J., & Verhoosel, C. V. (2012). *Nonlinear finite element analysis of solids and structures: John Wiley & Sons*, ISBN:1118376013
- De Castro, N., Cobos, F., Dana, J., & Márquez, A. *Teselaciones y Grafos de Intersección de Segmentos en Superficies no Planas*. Vol,(Número.
- Diaz Mendez, P. P., & Vasquez Sandoval, M. (2005). *Evaluacion de propiedades físicas y mecanica de madera de Nothofagus glauca (Phil) Krasser proveniente de la zona de Cauquenes. Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingenieria en Industrias de la Madera.*, Número de Documento,
- Dransfield, S., & Widjaja, E. (1995). *Bamboos. Plant Resources of South-East Asia, No. 7. Bogor: Prosea*, Vol,(Número.
- Dunkelberg, K. (1985). *Bamboo as a building material: Institute For Lightweight Structures*,
- E.100-Bambú. P. F. [2017]. (2012). *Norma Técnica: E. 100 Bambú. 58. (1). Lima, Perú: Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento*.
- F. A. E. Comando Conjunto. Fuerzas Armadas del Ecuador Comando Conjunto & Subsecretaría General de Planificación para el Buen Vivir. (2012). *Actualización proyecto mejoramiento de la infraestructura de las guarniciones militares 2013-2016. 47. Quito: Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo*.
- FEMA P-85. (2009). *Protecting Manufactured Homes from Floods and Other Hazards: A Multi-hazard Foundation and Installation Guide. Paper presentado en la National Conference of States on Building Codes and Standards*,
- Fundación Brethren y Unida, Junta Administradora del Sistema Regional de Agua Potable "Olón", Nazioarteko Elkartasuna-Solidaridad Internacional (NE-SI), Gobierno Vasco. Fondos FOCAD, Consejo Provincial de Santa Elena, Ministerio del Ambiente, & Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR). (2010). *Proyecto "Manejo integral de la caña guadúa: Beneficios ambientales y económicos para las comunidades del norte de Manglaralto". 32. Quito: SOBOD GRAFIC*.

- García Pazmiño, C. G. (2013). *Estudio de comportamiento de demanda para el uso de caña guadua y bambú gigante en Ecuador. (Bachelor Thesis), ESPE/2013, Sangolquí, Ecuador, Departamento de Ciencias Económicas Administrativas y de Comercio, Número de Documento: 037577 <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/6595>*
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (2009). *Mecánica de materiales. Cengage Learning, México, Vol,(Número 1).*
- Ghavami, K., & Marinho, A. B. (2001). *Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie do bambu da espécie Guadua angustifolia Guadua angustifolia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol: 9,(Número: 1), 107-114.*
- González, O. (2015). *An engineering approach to understand senile coconut palms as foundation for biomimetic applications. Ph. D. thesis, Griffith School of Engineering, Griffith University, Gold Coast Campus, Australia, Número de Documento, <http://hdl.handle.net/10072/367602>*
- González, O. (2018). *The Ingenious Tree of Life - A biomechanical Approach to Cocowood Science (first ed.). Germany: Lambert Academic Publishing, ISBN:9786139870004*
- Grosser, D., & Liese, W. (1971). *On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. Wood Science and technology, Vol: 5,(Número: 4), 290-312. ISSN:0043-7719*
- Gutiérrez González, M. (2011). *Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua Angustifolia Kunth. Departamento de ingeniería civil y agrícola, Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá DC, Colombia, Vol,(Número).*
- Hammond, G., & Jones, C. (2008). *Inventory of carbon & energy: ICE (Vol. 5): Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering.*
- Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (2013). *Emergent technologies and design: towards a biological paradigm for architecture: Routledge, ISBN:1134721447*
- Hidalgo López, O. (1981). *Manual de construcción con bambú. Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos LTDA-Editores, Vol,(Número).*
- Huang, P., Zeidler, A., Chang, W.-s., Ansell, M. P., Chew, Y. J., & Shea, A. (2016). *Specific heat capacity measurement of Phyllostachys edulis (Moso bamboo) by differential scanning calorimetry. Construction and Building Materials, Vol: 125,(Número, 821-831. ISSN:0950-0618*
- Hughes, T. J. (2012). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis: Courier Corporation, ISBN:0486135020*

- IGM, & EPN. Instituto Geográfico Militar & Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional. (2016). *Informe Sísmico Especial N. 25-2016. 1. 17. Quito, Ecuador: PM, EGP.* DOI: 1360
- INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2016). *Análítico: Anuarios Meteorológicos 2000-2016. 48. 123. Quito, Ecuador.* DOI: 13903586
- INBAR. (2015). *Norma Andina para Diseño y Construcción de casas de uno y dos pisos de bahareque encementado; Red Internacional del Bambú y el Ratán (A. A. Jaramillo Ed.). Quito, Ecuador Abril 2015: Quito, ISBN:978-92-95098-73-2*
- INBAR, Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador, Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, & Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. (2018). *Taller de Diseño y Cálculo Estructural con Bambú. Sangolqui,*
- ISO-22156. International Standard ISO 22156. (2004). *Bamboo Structural Design. ISO Geneva.*
- ISO-22157-1. International Standard ISO 22157-1. (2004). *Bamboo—determination of physical and mechanical properties—Part I: Requirements. ISO Geneva.*
- ISO-22157-2. International Standard ISO 22157-2. (2004). *Bamboo—determination of physical and mechanical properties—Part II: Laboratory manual. ISO Geneva.*
- Janssen, J. J. (1981). *Bamboo in building structures.* Vol. 1
- Jaquit, N. (2000). *Care of Bamboo. American Bamboo Society.*
- JUNAC. Junta del Acuerdo de Cartagena. (1984). *Manual de diseño para maderas del grupo andino.*
- Júnior, A. d. S. S., Junior, J., Torres, S. M., Barros, S., Ortiz, S. R., & Barbosa, N. P. (2009). *Bamboo pH and absorption in different liquids. 6-9, Paper presentado en la Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009),*
- Kaur, P. J., Satya, S., Pant, K. K., & Naik, S. N. (2016). *Eco-friendly preservation of bamboo species: traditional to modern techniques. BioResources, Vol: 11,(Número: 4), 10604-10624. ISSN:1930-2126*
- Khan, M. W. (1962). *Determination of culm age in bamboo. Indian Forester, Vol: 88,(Número: 8), 533-542. ISSN:2321-094X*
- Kliger, I. R., & Pellicane, P. J. (1996). *Shear properties of components used in stressed-skin panels. Journal of materials in civil engineering, Vol: 8,(Número: 2), 77-82. ISSN:0899-1561*

- La Tegola, A., Yépez Roca, L. O., Mera Ortíz, W. V., & Córdova Alcívar, P. L. (2015). *Determinación de las propiedades mecánicas de la Caña Guadua Angustifolia del Ecuador cuando está sometida a Fuerzas Axiales*. Vol: 17,(Número: 1), 54-61. DOI: <https://doi.org/10.23878/alternativas.v16i3.84> ISSN:1390-1915
- Latif, A., & Razak, A. (1991). *Availability, distribution of bamboo and its industrial status in Peninsular Malaysia*. 27-30, Paper presentado en la *Bamboo in Asia and the Pacific. Proceedings of the Fourth International Bamboo Workshop*. Chiangmai, Thailand,
- Lee, A. W., Bai, X., & Peralta, P. N. (1994). *Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grown in South Carolina*. *Forest Products Journal*, Vol: 44,(Número: 9), 40. ISSN:0015-7473
- Leiva, M., & Omar, A. (2010). *Monografía. Recomendaciones para la modelación por el Método de los Elementos Finitos*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Número de Documento,
- Liese, W. (1992). *The structure of bamboo in relation to its properties and utilization*. 7-11, Paper presentado en la *Zhu, S., Li, W., Zhang, X. Wang, Z. ed., Bamboo and its use. Proceedings of the International symposium on Industrial Use of Bamboo*, Beijing, China,
- Londoño, X. (1990). *Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambúes de Colombia (Poaceae: Bambusoideae)*. *Caldasia*, Vol,(Número, 139-153. ISSN:0366-5232
- Londoño, X. (2002). *Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo*. *Cátedra Maestría en Construcción. Módulo Guadua, Arquitectura*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, Vol,(Número.
- Londoño, X. (2011). *El bambú en Colombia*. *Bioteología Vegetal*, Vol: 11,(Número: 3). ISSN:2074-8647
- MAGAP. Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca. (2017). *Guía Técnica para el Manejo, Aprovechamiento y Elaboración de Programas de Corta de Caña Guadúa (Guadúa angustifolia) y Bambú Gigante (Dendrocalamus asper)*. 1. 35. Guayaquil: Subsecretaría de Producción Forestal.
- Manotas, E., Yáñez, S., Lopera, C., & Jaramillo, M. (2008). *Estudio del efecto de la dependencia en la estimación de la confiabilidad de un sistema con dos modos de falla concurrentes*. *Dyna*, Vol: 75,(Número: 154). ISSN:0012-7353
- Manriquez, G. R. L. (2002). *Correlación entre métodos analíticos y numéricos para el cálculo de vigas y paneles de estructuras tipo Sandwich*. Universidad Austral de Chile, Número de Documento,

- Martínez Fernández, J. A. (2015). *Construcción de tableros y péndolas en puentes colgantes peatonales con bambú como material local. (Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras de Acero y de Hormigón Armado), Universidad de Cuenca, Cuenca, Facultad de ingeniería civil, Número de Documento: TE4;181, <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21971>*
- Martínez Rodríguez, M. E. (2005). *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escurialense*, Vol,(Número: 38), 315-331. ISSN:1133-3677
- MEER. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable and BID. (2014). *"ATLAS EÓLICO DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA."*. 56. (621312136). Quito.
- Mercedes, J. R. (2006). *Guía técnica cultivo del bambú (G. Morales Ed.). Santo Domingo, República Dominicana: CEDAF, Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, ISBN:9993459046*
- MIDUVI. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Gobierno de la República del Ecuador & Subsecretaría de hábitat y asentamientos humanos - SHAH. (2015). *Tercera Conferencia de las Naciones Unidas Sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible HABITAT III. 5. 110. (0718-3607)*. Quito.
- Minke, G. (2012). *Building with Bamboo: Walter De Gruyter Incorporated*, ISBN:9783034607483
- Mognon, F. (2014). *Estimativas de biomasa para plantas de bambu do género Guadua/Biomass estimation for Guadua bamboo plants. Bambusa Bambú estudio*, Vol: 61,(Número: 6), 900. ISSN:0034-737X
- Naik, N. (2004). *Mechanical and Physico-Chemical properties of bamboo carried out by Aerospace Engineering Department, Indian Institute of Technology Bombay*. Vol,(Número. ISSN:30:1779-1822
- NEC-SE-CG. Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Cargas (No Sísmicas)*.
- NEC-SE-GUADÚA. Norma Ecuatoriana de la Construcción & Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional. (2016). *Estructuras de Guadúa (GaK). 1. 109. (033-16). Quito, Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Gobierno de la República del Ecuador*.
- NEC-SE-RE. Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Riesgo sísmico, evaluación y rehabilitación de estructuras*.
- Neufert, E., Graf, P., Mittmann, P., & Neufert, P. (1995). *Arte de proyectar en arquitectura: Gustavo Gili*, ISBN:9688873373
- New South Wales Department of Planning. NSW. (2009). *Building Sustainability Index. Sydney*.

- Nguyen, C. T., Wagenführ, A., Dai, V. H., Bremer, M., & Fischer, S. (2012). *The effects of thermal modification on the properties of two Vietnamese bamboo species, Part I: effects on physical properties*. *BioResources*, Vol: 7,(Número: 4), 5355-5366. ISSN:1930-2126
- Niklas, K. J. (1992). *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function: University of Chicago press*, ISBN:0226586316
- NSR, N. S. R. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogota D.C.
- Olivier, J. (2008). *Gramíneas (Poaceae) bambusiformes del Río de Los Amigos, Madre de Dios, Perú*. *Revista peruana de biología*, Vol: 15,(Número: 1), 121-126. ISSN:1727-9933
- Pakhkeree, T. (1997). *Physical and mechanical properties of Dendrocalamus asper Becker*. MSc Thesis, Kasetsart University, Thailand, Número de Documento,
- Palermo, A., Pampanin, S., Buchanan, A., & Newcombe, M. (2005). *Seismic design of multi-storey buildings using laminated veneer lumber (LVL)*. Vol,(Número.
- Pevsner, N., & Bohigas, O. (1979). *Historia de las tipologías arquitectónicas: Gustavo Gili*, ISBN:8425209153
- Pilco Díaz, E. P. (2016). *Estudio de las propiedades Físico Mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth de Loja, e implementación de este como material de construcción*. . (bachelorThesis), Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Área Técnica, Número de Documento: 1171657, <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/14399>
- Prates, E. M. B. (2013). *Morfología externa e anatomia do colmo de Dendrocalamus asper (Poaceae: Bambusoideae) em duas localidades no Distrito Federal, Brasil*. Vol,(Número.
- Puigdomènech, P. (1986). *Enciclopedia de las Ciencias; Las plantas, el mundo de la botánica*. Ediciones Orbis SA Madrid, ES, Vol: 1,(Número, 132-133.
- Qisheng, Z., Shenxue, J., & Yongyu, T. (2002). *Industrial utilization on bamboo: International network for bamboo and rattan*, ISBN:9628512471
- Queipo de Llano Moya, J., González Rodrigo, B., Llinares Cervera, M., Villagrà Fernández, C., & Gallego Guinea, V. (2010). *Guía de construir con madera. Madrid-España: Construir con madera (CcM)*, ISBN:978-84-693-1288-9
- RAE. Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la Lengua Española-Edición del Tricentenario*. 15. 2432. (9788467041897). Madrid, España.
- Ramírez, A. (2009). *La construcción sostenible. ¿Cuánto cuesta realmente la sostenibilidad?*, Vol: 13,(Número, 47-51. ISSN:2335-5573

- Rea Lozano, V. (2012). *Uso de la Caña Guadua como Material de Construcción: Evaluación Medio Ambiental frente a Sistemas Constructivos Tradicionales (masterThesis)*, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica Número de Documento: 0126, <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/356>
- Richard, M. J. (2013). *Assessing the performance of bamboo structural components*. University of Pittsburgh, Número de Documento,
- Rodríguez Hernández, R. (2017). *El Bambú como refuerzo en materiales compuestos para la construcción. (Maestría)*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil., Santa Clara, Cuba, Número de Documento, <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/8894>
- Rodríguez, N., Dill, W. O., Bidegaray, P., & Botero, R. (2006). *Utilización del bambú (Guadua angustifolia Kunth) (Bambusoideae: Gramineae) como una alternativa sostenible de construcción de viviendas en la zona atlántica de Costa Rica*. Revista de la universidad EARTH, Vol: 2,(Número, 77-85. ISSN:1659-2751
- Rungthonkit, P. (2012). *Structural behaviour of structural insulated panels (SIPS)*. University of Birmingham, Número de Documento,
- Salazar, M. d. C. L. (2017). *Cultivo de Bambú como Recurso Natural Renovable para la Reforestación en la Quebrada Echeverría*. Revista Cientific, Vol: 2,(Número: 6), 238-254. ISSN:2542-2987
- Sánchez Martínez, A. M. (2017). *Propagación vegetativa de Dendrocalamus asper, Guadua angustifolia y Bambusa vulgaris (bambú), en el Vivero Bambunet del cantón Archidona, provincia de Napo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Número de Documento: FRN-CENID-UD;33T0171, <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7665>
- Sánchez Medrano, M. T., Espuna Mújica, J. A., & Roux Gutierrez, R. S. (2016). *El bambú como elemento estructural: la especie Guadua amplexifolia*. Nova scientia, Vol: 8,(Número: 17), 657-677. ISSN:2007-0705
- Schimleck, L. R., Michell, A. J., Raymond, C. A., & Muneri, A. (1999). *Estimation of basic density of Eucalyptus globulus using near-infrared spectroscopy*. Canadian Journal of Forest Research, Vol: 29,(Número: 2), 194-201. ISSN:0045-5067
- Secretaría de Agriculturas, G., Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). *Agenda Técnica Agrícola de Chiapas (2da Edición ed.)*. Mexico: MVZ Enrique Sánchez Cruz; Dr. Luis Fernando Flores Lui, ISBN:978-607-7668-42-8
- SENPLADES. *Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo*. (2014). *Fichas de cifras generales*. 5.

- Seyfang, G. (2010). *Community action for sustainable housing: Building a low-carbon future. Energy Policy*, Vol: 38,(Número: 12), 7624-7633. ISSN:0301-4215
- SGR. *Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos. (2016). Informe de Situación No. 65 Terremoto 7.8° Pedernales. 10. 17. (65). Pedernales: Ecuador.*
- Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los próximos*, Vol: 10,(Número, 57).
- Soderstrom, T. R., & Calderon, C. E. (1979). *A commentary on the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). Biotropica*, Vol,(Número, 161-172). ISSN:0006-3606
- Speck, T., & Burgert, I. (2011). *Plant stems: functional design and mechanics. Annual review of materials research*, Vol: 41,(Número, 169-193). ISSN:1531-7331
- Stamm, J. (2008). *La evolución de los métodos constructivos en bambú. 8, 11, Paper presentado en la Segundo Congreso Mexicano del Bambú, , Puebla, México, DOI: 2786–2791,*
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1993). *Materiales de construcción apropiados: catálogo de soluciones potenciales: SKAT (Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management)*, ISBN:3908001552
- Suntaxi Llumiquinga, C. A. (2014). *Diseño y construcción de un sistema de dirección para un vehículotrimoto.Latacunga-Espe-2014*,Número de Documento,  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7737>
- Surjokusumo, S., & Nugroho, N. (1995). *A study on Dendrocalamus asper as concrete reinforcement. Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IV International Bamboo Congress. Indonesia*, Vol: 14,(Número: 1), 92-98. ISSN:1693-3095
- Tamarit-Urias, J., & Fuentes-Salinas, M. (2003). *Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, Vol: 9,(Número: 2). ISSN:2007-3828
- Tandazo Regalado, J. (2012). *Proceso de industrialización de la caña guadua como material alternativo para la construcción y diseño de vivienda tipo de una o dos plantas, empleando caña guadua en sus elementos estructurales. (Bachelor), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador,Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción*, Número de Documento: 034425  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5892>
- Thun, M. (2001). *Calendario Agrícola 2001. In F. Valles (Ed.). Bolivia.*
- Torres Montenegro, A. (2012). *Determinar la influencia de la luna en la agricultura. (Pregrado Monografía), Universidad de Cuenca, Cuenca,Facultad de Ciencias Agropecuarias*, Número de Documento: MAG;136, <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3078>

- Tovar, O. (1993). *Las Gramíneas (Poaceae) del Perú (Vol. 13): Editorial CSIC-CSIC Press*, ISBN:8400073738
- Ubidia, J. A. M. (2002). *Preservación del bambú en América Latina, mediante métodos tradicionales: International Network for Bamboo and Rattan-INBAR*, ISBN:9628512463
- Ugural, A. (2003). *Mechanical design: an integrated approach: McGraw-Hill Science/Engineering/Math*, ISBN:0072921854
- Universidad Centroamericana Jose Simeón Cañas. (2008). *Propiedades mecánicas: curva Esfuerzo - Deformación Unitaria*.
- Villanueva, F. P., Córdor, J. P., & Alca, A. M. (2014). *Experiencias sobre la silvicultura y usos del bambú en Colombia. Xilema*, Vol: 27,(Número: 1), 17-23. ISSN:1997-6496
- Vongvijitra, R. (1988). *Traditional vegetative propagation and tissue culture of some Thai bamboos. 148-150, Paper presentado en la Bamboos current research. Proceedings of the international bamboo workshop*,
- Wegst, U., & Ashby, M. (2004). *The mechanical efficiency of natural materials. Philosophical Magazine*, Vol: 84,(Número: 21), 2167-2186. ISSN:1478-6435
- Wegst, U. G. (2011). *Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol: 4,(Número: 5), 744-755. ISSN:1751-6161
- Widmer, Y. (1990). *Los Bambues: biología, cultivo, manejo usos: CATIE, Turrialba (Costa Rica)*.
- Williams, J. (1987). *Micropower circuits for signal conditioning. Linear Technology Corporation, Application Note*, Vol: 23,(Número, 197-198.
- Xiao, Y., Inoue, M., & Paudel, S. K. (2008). *Modern Bamboo Structures: Proceedings of the First International Conference: CRC Press*, ISBN:0203888928
- Yebra, Ó. G. (2014). *Caracterización del bambú Guadua (Guadua Angustifolia) para el diseño e industrialización en España (Vol. 94): Universidad Almería*, ISBN:8416027129
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Nithiarasu, P., & Zhu, J. (1977). *The finite element method (Vol. 3): McGraw-hill London*,

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Informe de identificación de la especie de estudio

**ANEXO 2.** Informe de suelos de la plantación de *Dendrocalamus asper* del Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “Cenepa” Quevedo-Ecuador

**ANEXO 3.** Desglose de resultados de todas las probetas ensayadas en compresión paralela a la fibra

**ANEXO 4.** Modos de falla de probetas ensayadas en compresión

**ANEXO 5.** Desglose de resultados de todas las probetas ensayadas en flexión perpendicular a las fibras

**ANEXO 6.** Modos de falla de probetas ensayadas en flexión

**ANEXO 7.** Desglose de resultados de todas las probetas ensayadas en tracción paralela a la fibra

**ANEXO 8.** Modos de falla de probetas ensayadas en tracción

**ANEXO 9.** Desglose de resultados de todas las probetas ensayadas en corte paralelo a la fibra

**ANEXO 10.** Modos de falla de probetas ensayadas en corte

**ANEXO 11.** Plano arquitectónico de la Vivienda N°1 – Prototipo social

**ANEXO 12.** Plano arquitectónico de la Vivienda N°2 – Prototipo particular

**ANEXO 13.** Cronograma Valorado de Obra para la Vivienda N°1 – Prototipo social

**ANEXO 14.** Cronograma Valorado de Obra para la Vivienda N°2 – Prototipo particular

**ANEXO 15.** Vivienda de madera referencial

**ANEXO 16.** Vivienda de hormigón armado referencial