



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**TEMA: ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA  
LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL EN CAÑA  
GUADÚA, COMO RESULTADO DEL ANÁLISIS DE UNA  
APLICACIÓN PRÁCTICA**

**AUTOR: TENORIO TACURI FRANCISCO ANDRÉS**

**DIRECTOR: DR. CAIZA, PABLO**

**CODIRECTOR: ING. PEÑAHERRERA, ESTUARDO**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

## CERTIFICACIÓN

**Dr. Pablo Caiza**

**Ing. Estuardo Peñaherrera**

**Certifican:**

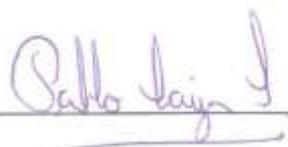
Que el trabajo titulado: ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL EN CAÑA GUADÚA, COMO RESULTADO DEL ANÁLISIS DE UNA APLICACIÓN PRÁCTICA, realizado por la Sr. Francisco Andrés Tenorio Tacuri, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

El mencionado trabajo consta de (un) documento empastado y (un) disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Se autoriza a Francisco Tenorio Tacuri que lo entregue a la Dr. PABLO CAIZA SÁNCHEZ en su calidad de Coordinadora de la Carrera.

Sangolquí, Mayo 2015

Dr. Pablo Caiza

Ing. Estuardo Peñaherrera



**DIRECTOR**



**CODIRECTOR**

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Francisco Andrés Tenorio Tacuri

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL EN CAÑA GUADÚA, COMO RESULTADO DEL ANÁLISIS DE UNA APLICACIÓN PRÁCTICA”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan en el texto cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Mayo 2015



---

Francisco Andrés Tenorio Tacuri

## AUTORIZACIÓN

Yo, Francisco Andrés Tenorio Tacuri

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado denominado ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL EN CAÑA GUADÚA, COMO RESULTADO DEL ANÁLISIS DE UNA APLICACIÓN PRÁCTICA, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Mayo 2015



---

Francisco Andrés Tenorio Tacuri

## **DEDICATORIA**

*A mi queridísima madre Esperanza, incondicional apoyo y aliento de mi vida.*

*A mi padre Francisco, guía y mentor.*

*A mis tíos Cecilia y Galo, admirables profesionales que nutren mi crecimiento laboral.*

*A mi toda familia, ejemplo íntegro a seguir.*

*A todos los amigos que fueron mi compañía y familia durante la carrera universitaria, compartiendo este reto y aventura.*

***Francisco Andrés Tenorio Tacuri.***

## **AGRADECIMIENTO**

Con todo mi ser agradezco a mis padres, su esfuerzo y sacrificio han hecho posible la culminación de esta etapa de instrucción académica.

Un profundo agradecimiento al Abg. Marcelo Farfán Intriago propietario de la hacienda “Las Delicias”, que nos brindó acceso a su puente elaborado en guadúa.

Igualmente agradezco a Pablo y Estuardo por compartir su valioso conocimiento y experiencia conmigo, excelentes profesores e investigadores.

A mi familia y amigos, con su compañía y afecto supere todas las adversidades.

**Francisco Andrés Tenorio Tacuri**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E IMPORTANCIA.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 GENERALIDADES DE LA GUADÚA ANGUSTIFOLIA KUNTH .....	5
2.2 MORFOLOGÍA DE LA GAK.....	7
2.3 FASES DE CRECIMIENTO .....	12
2.4 CALIDAD DEL SUELO PARA SIEMBRA DE LA GAK .....	14
2.5 RÉGIMEN DE APROVECHAMIENTO DE LA GAK .....	15
2.6 PATOLOGÍA Y PRESERVACIÓN DE LA GAK.....	16
2.6.1 Biodegradación por insectos y hongos .....	17
2.6.2 Factores que influyen la tratabilidad y preservación de los culmos .....	19
2.6.3 Técnicas de Preservación de la GAK .....	21

2.6.4 Condiciones que debe cumplir la técnica de preservación de la GAK.....	23
2.7.1 Técnicas de curado .....	24
Curado en la mata.....	25
Curado por inmersión en agua .....	26
Curado por calor.....	27
Inmersión con solución de ácido bórico y bórax .....	28
Inyección con solución de ácido bórico y bórax .....	29
Método de Boucherie .....	30
Método de Boucherie modificado con solución de ácido bórico y bórax.....	30
Método Boucherie modificado con ácido piroleñoso .....	31
Preservación con humo (en horno vertical) .....	32
2.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GAK.....	32
2.7.1 Contenido de Humedad .....	33
2.7.2 Masa por volumen .....	34
2.7.3 Peso específico.....	35
2.7.4 Geometría de la sección de GAK .....	35
2.8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA GAK.....	36
2.9 ESFUERZOS ADMISIBLES PARA DISEÑO CON GAK.....	40
2.10 MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA EL DISEÑO CON GAK.....	41
2.11 BASES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL CON GAK.....	42
2.12 DISEÑO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN.....	43
2.12.1 Deflexiones.....	44
2.12.2 Efecto del cortante.....	45
2.12.3 Cargas para el cálculo de secciones y deflexiones.....	45
2.12.4 Flexión.....	46
2.12.5 Estabilidad lateral y coeficiente de modificación ( <b>CL</b> ).....	46

2.12.6 Estabilidad lateral de vigas compuestas.....	47
2.12.7 Momento resistente.....	48
2.13 DISEÑO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE GAK.....	50
2.13.1 Elementos conectores de las secciones compuestas.....	50
2.14 DISEÑO POR APLASTAMIENTO EN ELEMENTOS DE GAK.....	51
2.16 DISEÑO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A FUERZA AXIAL.....	52
2.16.1 Elementos solicitados a tracción axial.....	52
2.16.2 Elementos solicitados a compresión axial.....	52
2.16.2.1 Revisión de esbeltez.....	53
2.16.2.2 Esfuerzos máximos en función al tipo de columna.....	55
2.17 DISEÑO DE ELEMENTOS SOLICITADOS POR FLEXIÓN Y CARGA AXIAL.....	56
2.17.1 Elementos solicitados a flexión con tracción axial.....	56
2.17.2 Elementos solicitados a flexo-compresión.....	57
CAPÍTULO III: TRANSFORMADA DE FOURIER EN ESPECTROSCOPIA.....	59
3.1 INTRODUCCIÓN.....	59
3.2 TRANSFORMADA DE FOURIER: DEFINICIÓN MATEMÁTICA.....	62
3.3 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT).....	63
3.3.1 Criterio de Nyquist.....	66
3.4 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT).....	67
3.4.1 FFT en el ordenador.....	68
3.4.2 Cálculo de la FFT y trazado del espectro de frecuencias en Microsoft Excel...69	
CAPÍTULO IV: ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	72
4.1 INTRODUCCIÓN.....	72
4.2 ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICA.....	72
4.2.1 Alcance.....	72

4.2.2	Objetivo.....	72
4.2.3	Materiales y equipos.....	72
4.2.4	Procedimiento ensayo carga estática.....	76
4.2.5	Cálculos ensayo carga estática.....	79
4.2.6	Resultados ensayo carga estática.....	81
4.2.6.1	Lecturas.....	81
4.2.6.2	Deflexiones.....	84
4.2.6.2	Deformaciones.....	85
4.3	ENSAYOS DE CARGA DINÁMICA.....	86
4.3.1	Alcance.....	86
4.3.2	Objetivo.....	86
4.3.3	Materiales y Equipos.....	87
4.3.4	Procedimiento.....	88
4.3.5	Cálculos ensayo carga dinámica.....	91
4.3.6	Resultados ensayo carga dinámica.....	93
	CAPÍTULO V: MODELO ANALÍTICO.....	120
5.1	INTRODUCCIÓN.....	120
5.2	ELABORACIÓN MODELO ANALÍTICO.....	121
5.2.1	Dibujo del modelo en AutoCAD 2013.....	121
5.2.2	Importación del modelo a SAP2000.....	125
5.2.3	Definición de materiales.....	127
5.2.4	Definición y asignación de secciones.....	132
5.2.4.1	Elementos simples.....	132
5.2.4.2	Elementos compuestos.....	135
5.2.4.3	Elementos tipo Área (Shell).....	141
5.2.5	Asignación de apoyos.....	144

5.2.6 Definición de tipos de carga.....	145
5.2.7 Asignación de carga estática. ....	146
5.2.8 Resultados de aplicación de carga muerta y carga ensayo estática. ....	148
5.2.9 Asignación de carga dinámica.....	153
5.2.10 Asignación de funciones periódicas para cargas dinámicas.....	155
5.2.11 Asignación de fuente de masas. ....	158
5.2.12 Resultados de aplicación de carga dinámica y funciones periódicas. ....	164
CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN PARA UN PUENTE	
PEATONAL DE GAK.....	179
6.1 INTRODUCCIÓN .....	179
6.2 OBJETIVO.....	179
6.3 ALCANCE .....	179
6.4 RESPONSABLES.....	180
6.5 ANTECEDENTES.....	180
6.6 PREPARATIVOS INICIALES.....	180
6.7 CIMIENTOS .....	188
6.8 ANCLAJE DE GAK A LOS SOBRE-CIMIENTOS.....	191
6.9 UNIONES .....	198
6.9.1 Tipos de cortes.....	198
6.9.2 Uniones diversas.....	200
6.9.3 Uniones longitudinales .....	201
6.9.4 Uniones de boca de pez .....	202
6.9.5 Uniones en diagonal .....	205
6.10 VIGAS COMPUESTAS .....	206
6.11 CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS.....	210
6.12 CERCHA.....	214

6.13 PISOS CON ESTRUCTURA DE CULMOS DE GAK .....	225
6.14 CUBIERTAS PARA ESTRUCTURAS CON GAK .....	230
6.15 MANTENIMIENTO .....	234
CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	237
7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS “ENSAYO DE CARGA ESTÁTICA” .....	237
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS “MODELO ANALÍTICO CARGA ESTÁTICA” .....	240
7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS “ENSAYO DE CARGA DINÁMICA” .....	242
7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS “MODELO ANALÍTICO CARGA DINÁMICA” .....	242
7.5 ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE PEATONAL.....	244
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	246
8.1 CONCLUSIONES .....	246
8.2 RECOMENDACIONES .....	248
8.3 OBSERVACIONES .....	249
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	251

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Esfuerzos admisibles $F_i$ (MPa), CH=12% (NSR-10, 2010). .....	40
<b>Tabla 2</b> Módulos de elasticidad $E_i$ (MPa), CH=12% (NSR-10, 2010). .....	41
<b>Tabla 3</b> Fórmulas para el cálculo de deflexiones (NSR-10, 2010). .....	44
<b>Tabla 4</b> Deflexiones admisibles dependiendo del tipo de cielo raso ..... en mm (NSR-10, 2010). .....	44
<b>Tabla 5</b> Valores de $C_c$ (NSR-10, 2010). .....	45
<b>Tabla 6</b> Cargas distribuidas $w$ para el cálculo de la sección y deflexiones (NSR-10, 2010). .....	45
<b>Tabla 7</b> Coeficientes $C_L$ para diferentes relaciones $d/b$ (NSR-10, 2010). .....	47
<b>Tabla 8</b> Módulos de sección para algunas vigas compuestas (NSR-10, 2010). .....	49
<b>Tabla 9</b> Coeficientes de longitud efectiva (NSR-10, 2010). .....	53
<b>Tabla 10</b> Clasificación de columnas por la esbeltez (NSR-10, 2010). .....	54
<b>Tabla 11</b> Etapa “sin carga” puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	81
<b>Tabla 12</b> Etapa “sin carga” puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	81
<b>Tabla 13</b> Etapa “totalmente cargada” puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	82
<b>Tabla 14</b> Etapa “totalmente cargada” puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	82
<b>Tabla 15</b> Etapa “deformada” puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	83
<b>Tabla 16</b> Etapa “deformada” puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	83
<b>Tabla 17</b> Deflexiones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	84
<b>Tabla 18</b> Deflexiones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	85
<b>Tabla 19</b> Deformaciones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	85
<b>Tabla 20</b> Deformaciones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	86
<b>Tabla 21</b> Cargas Dinámicas y estáticas aplicadas en la estructura (Autor, 2014). ....	91
<b>Tabla 22</b> Deflexiones analíticas en los puntos de 1-7 (Autor, 2014) .....	152
<b>Tabla 23</b> Deflexiones analíticas en los puntos de 10-30 (Autor, 2014) .....	153
<b>Tabla 24</b> Frecuencias de saltos oscilatorios aplicados sobre estructura de GAK (Autor, 2014) .....	156
<b>Tabla 25</b> Resumen de frecuencias y períodos de vibración “ensayo de carga dinámica” (Autor, 2015) .....	242

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fotografía de la caña guadúa ( <i>Guadúa angustifolia kunth</i> ) (Stamm, 2010).....	5
Figura 2.2. Raíces de la caña guadúa (GAK) (Narváez, 2013).....	7
Figura 2.3. Partes del tallo de un GAK (Stamm, 2010). ....	8
Figura 2.4. Corte transversal del culmo de la GAK (Londoño, 2002).....	9
Figura 2.5. Corte longitudinal del culmo de la GAK (Londoño, 2002).....	9
Figura 2.6. Haz vascular de GAK (Londoño, 2002). ....	10
Figura 2.7. Morfología de las hojas del GAK. A, hojas caulinares. B, hojas del follaje. C, fragmento de la GAK con nudos y hojas caulinares (TENECHÉ, 2007). 11	11
Figura 2.8. Inflorescencia de GAK (Narváez, 2013) .....	12
Figura 2.9. Fases de crecimiento de la GAK (Tandazo & Flores, 2012).....	13
Figura 2.10. <i>Dinoderus minutus</i> (plaga de GAK) (Silva, 2008) .....	17
Figura 2.11. Hongos en el Culmo de GAK (FUNDEGUADUA, 2010) .....	18
Figura 2.12. Culmos de GAK parejos con distancia entre nudos similar es (Londoño, 2002).....	22
Figura 2.13. Culmos secos e inmunizados de GAK (Londoño, 2002). ....	23
Figura 2.14. A la izquierda, culmos con conservantes ineficaces. A la derecha, químico tóxico para el ambiente (Londoño, 2002). ....	23
Figura 2.15. Técnica de curado en la mata. Culmos apoyados contra guadúas vecinas (Stamm, 2010).....	25
Figura 2.16. Técnica de curado en la mata. Culmos reposando bajo una cubierta seca y ventilada (Montoya, 2008) .....	26
Figura 2.17. Curado por inmersión en agua (Silva, 2008). ....	27
Figura 2.18. Curado por calor (Tandazo & Flores, 2012).....	28
Figura 2.19. Curado por Inmersión con solución de ácido bórico y bórax (Londoño, 2002).....	29
Figura 2.19. Curado por Inmersión con solución de ácido bórico y bórax (Londoño, 2002).....	30
Figura 2.21. Método Boucherie “por gravedad” (Cobos & León, 2007).....	30
Figura 2.22. Método Boucherie modificado (Londoño, 2002). ....	31

Figura 2.23. Horno Vertical para secado con humo (Tandazo & Flores, 2012).	32
Figura 2.24. Diámetros de secciones transversales (Cobos & León, 2007).	36
Figura 2.25. Espesores de la sección transversal (Cobos & León, 2007).	36
Figura 2.26. Deformación axial genera por esfuerzo de tensión y compresión (Vélez, 2013).	39
Figura 2.27. Grafico esfuerzo-deformación, limite elástico (Wikipedia.org, 2014).	40
Figura 2.28. Ejemplo de sección compuesta, alto y ancho (NSR-10, 2010).	47
Figura 3.1 Espectro de aceleraciones, amplitud vs frecuencia.	60
Figura 3.2 Señal analógica sinodal amplitud vs tiempo.	60
Figura 3.3 Señal digital sinodal amplitud vs tiempo.	62
Figura 3.4 Componentes de la DFT: tiempo de muestreo $T$ , tiempo entre datos $\Delta t$ , número de muestras $N$ .	65
Figura 3.5 Señal de periódica real $T=0,1$ s y período d muestreo $T=0,17$ s.	65
Figura 3.6 Espectro de frecuencia o espectro de amplitud.	69
Figura 4.1 Cinta métrica y flexómetro.	73
Figura 4.2 Arena de río.	73
Figura 4.3 Saquillos de yute.	74
Figura 4.4 Balanza colgante.	74
Figura 4.5 Deformímetro BAKER.	75
Figura 4.6 Teodolito NIKON.	76
Figura 4.7 Esquema de puntos monitoreados con teodolito.	78
Figura 4.8 Triangulo Rectángulo (Wikipedia.org, 2014).	80
Figura 4.9 Acelerómetro LIBELIUM instalado en una columna del puente.	87
Figura 4.10 Software WaspMote-API V.0.33.	88
Figura 4.11 Esquema de ubicación de acelerómetros.	90
Figura 4.12 Acelerograma sensor "A", carga dinámica cada 0.5 s.	93
Figura 4.13 Acelerograma sensor "B", carga dinámica cada 0.5 s.	94
Figura 4.14 Acelerograma sensor "C", carga dinámica cada 0.5 s.	94
Figura 4.15 Acelerograma sensor "D", carga dinámica cada 0.5 s.	94
Figura 4.16 Acelerograma sensor "E", carga dinámica cada 0.5 s.	95
Figura 4.17 Acelerograma sensor "G", carga dinámica cada 0.5 s.	95
Figura 4.18 Acelerograma sensor "H", carga dinámica cada 0.5 s.	96

Figura 4.19	Acelerograma sensor “I”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	96
Figura 4.20	Espectro de frecuencia “A”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	97
Figura 4.21	Espectro de frecuencia “B”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	97
Figura 4.22	Espectro de frecuencia “C”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	97
Figura 4.23	Espectro de frecuencia “D”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	98
Figura 4.24	Espectro de frecuencia “E”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	98
Figura 4.25	Espectro de frecuencia “G”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	98
Figura 4.26	Espectro de frecuencia “H”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	99
Figura 4.27	Espectro de frecuencia “I”, carga dinámica cada 0.5 s. ....	99
Figura 4.28	Acelerograma sensor “A”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	100
Figura 4.29	Acelerograma sensor “B”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	100
Figura 4.30	Acelerograma sensor “C”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	101
Figura 4.31	Acelerograma sensor “D”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	101
Figura 4.32	Acelerograma sensor “E”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	101
Figura 4.33	Acelerograma sensor “G”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	102
Figura 4.34	Acelerograma sensor “H”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	102
Figura 4.35	Acelerograma sensor “I”, carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	102
Figura 4.36	Espectro de frecuencia “A” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	103
Figura 4.37	Espectro de frecuencia “B” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	103
Figura 4.38	Espectro de frecuencia “C” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	104
Figura 4.39	Espectro de frecuencia “D” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	104
Figura 4.40	Espectro de frecuencia “E” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	105
Figura 4.41	Espectro de frecuencia “G” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	105
Figura 4.42	Espectro de frecuencia “H” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	105
Figura 4.43	Espectro de frecuencia “I” carga estática y dinámica cada 0.5 s. ....	106
Figura 4.44	Acelerograma sensor “A”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	106
Figura 4.45	Acelerograma sensor “B”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	107
Figura 4.46	Acelerograma sensor “C”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	107
Figura 4.47	Acelerograma sensor “D”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	108
Figura 4.48	Acelerograma sensor “E”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	108
Figura 4.49	Acelerograma sensor “G”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	108
Figura 4.50	Acelerograma sensor “H”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	109

Figura 4.51 Acelerograma sensor “I”, carga dinámica cada 1.0 s. ....	109
Figura 4.52 Espectro de frecuencia “A” carga dinámica cada 1.0 s. ....	110
Figura 4.53 Espectro de frecuencia “B” carga dinámica cada 1.0 s. ....	110
Figura 4.54 Espectro de frecuencia “C” carga dinámica cada 1.0 s. ....	111
Figura 4.55 Espectro de frecuencia “D” carga dinámica cada 1.0 s. ....	111
Figura 4.56 Espectro de frecuencia “E” carga dinámica cada 1.0 s. ....	111
Figura 4.57 Espectro de frecuencia “G” carga dinámica cada 1.0 s. ....	112
Figura 4.58 Espectro de frecuencia “H” carga dinámica cada 1.0 s. ....	112
Figura 4.59 Espectro de frecuencia “I” carga dinámica cada 1.0 s. ....	112
Figura 4.60 Acelerograma sensor “A”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	113
Figura 4.61 Acelerograma sensor “B”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	113
Figura 4.62 Acelerograma sensor “C”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	114
Figura 4.63 Acelerograma sensor “D”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	114
Figura 4.64 Acelerograma sensor “E”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	115
Figura 4.65 Acelerograma sensor “G”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	115
Figura 4.66 Acelerograma sensor “H”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	115
Figura 4.67 Acelerograma sensor “I”, carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	116
Figura 4.68 Espectro de frecuencia “A” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	116
Figura 4.69 Espectro de frecuencia “B” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	117
Figura 4.70 Espectro de frecuencia “C” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	117
Figura 4.71 Espectro de frecuencia “D” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	118
Figura 4.72 Espectro de frecuencia “E” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	118
Figura 4.73 Espectro de frecuencia “G” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	118
Figura 4.74 Espectro de frecuencia “H” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	119
Figura 4.75 Espectro de frecuencia “I” carga estática y dinámica cada 1.0 s. ....	119
Figura 5.1. Detalle de la estructura de la cubierta del puente de GAK y sus dimensiones elaborada en AutoCAD 2013. ....	121
Figura 5.2. Fachada lateral longitudinal de estructura de GAK y sus dimensiones elaborada en AutoCAD 2013. ....	122
Figura 5.3. Estructura completa en 3D dibujada con AutoCAD 2013. ....	123
Figura 5.4. Menú Archivo opción Exportar AutoCAD 2013. ....	124

Figura 5.5. Ventana auxiliar para exportar el dibujo a SAP2000 desde AutoCAD 2013.....	124
Figura 5.6. Menú archivo opción Importar SAP2000.....	125
Figura 5.7. Ventana auxiliar de selección archivo para importar SAP2000. ....	125
Figura 5.8. Ventana “Información Importante” previa importación del modelo a SAP2000. ....	126
Figura 5.9. Ventana “Importar DXF” selección de capas a importar a SAP2000. ..	126
Figura 5.10. Modelo 3D en SAP2000.....	127
Figura 5.11. Ventana “Opciones de propiedades de material” en SAP2000. ....	128
Figura 5.12. Datos de propiedades del material GAK en SAP2000. ....	129
Figura 5.13. Datos de propiedades del material CADE en SAP2000.....	131
Figura 5.14. Datos de propiedades del material DUELA en SAP2000. ....	132
Figura 5.15. Selección de elementos simples en SAP2000. ....	133
Figura 5.16. Asignación de tipo de elemento Frame en SAP2000. ....	133
Figura 5.17. Ventana Selección nueva propiedad de sección en SAP2000.....	134
Figura 5.18 Opciones de tipo de sección para acero en SAP2000.....	134
Figura 5.19. Definición de la sección tipo tubo de acero SAP2000. ....	135
Figura 5.20. Selección de elementos conformados por dos culmos de GAK en SAP2000. ....	136
Figura 5.21. Diseñador de sección en SAP2000.....	136
Figura 5.22. Datos de sección “GAK E2” en SAP2000. ....	137
Figura 5.23. Ventana “GAK E2” definición de material y dimensiones en SAP2000. ....	137
Figura 5.24. Selección de elementos conformados por cuatro culmos de GAK en SAP2000. ....	138
Figura 5.25. Datos de sección “GAK E4” en SAP2000. ....	138
Figura 5.26. Ventana “GAK E4” definición de material y dimensiones en SAP2000. ....	139
Figura 5.27. Selección de elementos conformados por seis culmos de GAK en SAP2000. ....	140
Figura 5.28. Datos de sección “GAK E6” en SAP2000. ....	140

Figura 5.29. Ventana “GAK E6” definición de material y dimensiones en SAP2000. ....	141
Figura 5.30. Vista extruida de los elementos de GAK en SAP2000.....	141
Figura 5.31. Definición de propiedades de elementos áreas. ....	142
Figura 5.32. Ventana secciones de Área en SAP2000. ....	142
Figura 5.33. Datos de la sección de “CUBIERTA” en SAP2000. ....	143
Figura 5.34. Elementos Shell de la Cubierta en SAP2000.....	143
Figura 5.35. Datos de la sección “TABLERO” en SAP2000. ....	144
Figura 5.36. Elementos Shell del tablero en SAP2000. ....	144
Figura 5.37. Asignar restricciones en juntas en SAP2000. ....	145
Figura 5.38. Ventana de restricción de juntas en SAP2000.....	145
Figura 5.39. Asignar tipos de carga en SAP2000. ....	146
Figura 5.40. Ventana “definición tipos de cargas” en SAP2000. ....	146
Figura 5.41. Áreas (A10 y A11) donde se asignaran cargas distribuidas en SAP2000. ....	147
Figura 5.42. Asignar cargas de área distribuidas uniformemente en SAP2000.....	148
Figura 5.43. Ventana “Cargas uniformes de área” en SAP2000.....	148
Figura 5.44. Definición de combinaciones de carga en SAP2000.....	149
Figura 5.45. Ventana auxiliar “Definir combinaciones de carga” en SAP2000. ....	149
Figura 5.46. Ventana auxiliar “Datos de combinación de carga” en SAP2000.....	150
Figura 5.47. Ventana “Programación de casos de carga” para el análisis en SAP2000. ....	150
Figura 5.48. Opción mostrar resultados en tablas en SAP2000.....	151
Figura 5.49. Ventana “Escoger tablas a mostrar” en SAP2000. ....	152
Figura 5.50. Ventana “Desplazamientos en juntas” opción exportar a Excel en SAP2000. ....	152
Figura 5.51. Juntas donde se aplicó masas en SAP2000.....	154
Figura 5.52. Opción masas en juntas en SAP2000. ....	154
Figura 5.53. Ventana auxiliar “Fuerzas de Junta” en SAP2000. ....	155
Figura 5.54. Opción historia en el tiempo en SAP2000.....	155
Figura 5.55. Ventana “Definir funciones de historia en el tiempo” en SAP2000...	156
Figura 5.56. Definición de frecuencia “DIN 1” en SAP2000. ....	157

Figura 5.57. Definición de frecuencia “DIN 2” en SAP2000.....	158
Figura 5.58. Opción definir “fuente de masa” en SAP2000. ....	158
Figura 5.59. Ventana fuente de masa, submenú masa por defecto en SAP2000. ...	159
Figura 5.60. Definición de fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000. ....	159
Figura 5.61. Definición de fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000.....	160
Figura 5.62. Opción definir “casos de carga” en SAP2000. ....	160
Figura 5.63. Ventana auxiliar “definir casos de carga”, botón “añadir nuevo caso de carga” en SAP2000. ....	161
Figura 5.64. Caso de carga ED1, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal (pt.1)”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000. ....	162
Figura 5.65. Caso de carga ED1, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal (pt.2)”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000.....	162
Figura 5.66. Caso de carga ED2, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000..	163
Figura 5.67. Árbol de casos de carga (Load Case Tree) en SAP2000.....	163
Figura 5.68. Caso de carga “MODAL”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000. ....	164
Figura 5.69. Definición de “MSSSRC1” como fuente de masas en SAP2000. ....	165
Figura 5.70. Programación caso de carga “MODAL” para el análisis en SAP2000. ....	165
Figura 5.71. Resultados y forma deformada del caso “MODAL” con fuente de masa “MSSSRC1” en SAP2000. ....	166
Figura 5.72. Definición de “MASA DIN” como fuente de masas en SAP2000.....	167
Figura 5.73. Casos de carga “MODAL” Y “ED1” para el análisis en SAP2000. ..	167
Figura 5.74. Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED1” función “DIN 1”, con fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000.....	169
Figura 5.75. Definición de “MASA DIN+EST” como fuente de masas en SAP2000. ....	170
Figura 5.76. Casos de carga “MODAL” y “ED1” para el análisis en SAP2000. ....	170
Figura 5.77. Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED1” función “DIN 1”, con fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000. ....	172

Figura 5.78. Definición de “MASA DIN” como fuente de masas en SAP2000.....	173
Figura 5.79. Casos de carga “MODAL” Y “ED2” para el análisis en SAP2000. ..	173
Figura 5.80. Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED2” función “DIN 2”, con fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000.....	175
Figura 5.81. Definición de “MASA DIN+EST” como fuente de masas en SAP2000.....	176
Figura 5.82. Casos de carga “MODAL” Y “ED2” para el análisis en SAP2000. ..	176
Figura 5.83. Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED2” función “DIN 2”, con fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000.....	178
Figura 6.1. Colocación de la guadúa sobre un pedestal y bajo techo (Teneche, 2011).....	182
Figura 6.2. No se debe colocar directamente en el suelo la guadúa destinada para la construcción del puente peatonal de GAK (Stamm, 2010). .....	183
Figura 6.3. Limpieza del terreno para la construcción (Stamm, 2010).....	184
Figura 6.4. Categorización de guadúas rectas y gruesas con diferentes diámetros (Stamm J. , 2010). .....	185
Figura 6.5. Categorización de guadúas, con una o más curvas (Stamm J. , 2010). ..	185
Figura 6.6. Planteamiento de cotas utilizando el sistema de Pitágoras (Stamm, 2010).....	186
Figura 6.7. Colocación del cable para la línea cero, y guadúas perpendiculares al cable para marcación de cotas (Stamm, 2010).....	187
Figura 6.8. Colocación de cable y guadúa perpendicular (Stamm, 2010). .....	187
Figura 6.9. Nivel utilizado para alineación de cotas (Stamm, 2010). .....	188
Figura 6.10. Zapata cuadrada individual (sobre-cimiento) de 50 cm de altura (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	189
Figura 6.11. Profundidad de desplante entre 1.50 y 2.40 (Lucker, 2010).....	189
Figura 6.12. Zapata cuadrada con arco para mejor adaptación de GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	190
Figura 6.13. Resultado negativo de la embebida de GAK directamente en una pared (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	191
Figura 6.14. Anclaje con varillas exteriores (AIS, 2002). .....	193

Figura 6.15. Relleno de canuto con mortero 1:2 para anclaje a sobre-cimiento (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	193
Figura 6.16. Anclaje de varias guadúas mediante varillas de acero (AIS, 2002). ...	194
Figura 6.17. Anclaje con varillas de acero internas (NEC-11 N. , 2013). ....	195
Figura 6.18. Anclaje mediante pletinas de acero. a) Ejemplo de un anclaje con dos pletinas para un culmo de 11 cm de diámetro. b) Vista en planta c) Lateral (NEC-11 N. , 2013).....	196
Figura 6.19. Anclaje empotrado o embebido al sobre-cimiento (AIS, 2002).....	197
Figura 6.20. Corte recto (NSR-10 R. C., 2010). ....	199
Figura 6.21. Corte boca de pez (NSR-10 R. C., 2010). ....	199
Figura 6.22. Corte boca de pez (Stamm, 2010).....	199
Figura 6.23. Corte pico de flauta (NSR-10 R. C., 2010).....	200
Figura 6.24. Cortes incorrectos en la GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	200
Figura 6.25. Unión longitudinal (NEC-11 N. , 2013).....	202
Figura 6.26. Relleno con mortero 1:2 para uniones longitudinales (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	202
Figura 6.27. Unión boca de pez mediante perno tensor y anclaje. a) Partes de la unión boca de pez. b) Vista lateral. c) Vista frontal (NEC-11 N. , 2013).....	203
Figura 6.28. Unión boca de pez mediante disco y media caña metálica. a) Componentes de la unión. b) Vista frontal. c) Vista lateral (NEC-11 N. , 2013). ...	205
Figura 6.29. Uniones en diagonal (NEC-11 N. , 2013).....	206
Figura 6.30. Viga compuesta formada por dos canutos unidos por un perno metálico (NEC-11 N. , 2013). ....	207
Figura 6.31. Viga compuesta formada por dos canutos unidos mediante un perno metálico y zunchos (NEC-11 N. , 2013).....	208
Figura 6.32. Relleno con mortero 1:2 para formar una viga compuesta (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	209
Figura 6.33. Perforaciones para el relleno de los entrenudos (Stamm, 2010). ....	209
Figura 6.34. Diferentes configuraciones de los culmos para formar vigas compuestas (Stamm, 2010). ....	210
Figura 6.35. Columna compuesta por 5 culmos y que soportan vigas dobles transversales (NEC-11 N. , 2013). ....	211

Figura 6.36. Columna principal formada por dos culmos (Stamm, 2010).....	212
Figura 6.37. Columnas espaciadas (Stamm, 2000).....	212
Figura 6.38. Columna auxiliar (Stamm, 2000). .....	213
Figura 6.39. Reforzamiento de columnas con pernos (izquierda) y varillas (derecha) (FUNDEGUADUA A. , 2010). .....	214
Figura 6.40. Configuraciones de los culmos para las columnas (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	214
Figura 6.41. Prefabricación de una cercha para puente peatonal de GAK (Stamm, 2010). .....	215
Figura 6.42. a) Combinado. b) Viga cargadora. c) Polígono. d) Arcos (Stamm, 2000).....	216
Figura 6.43. Prefabricación de una cercha con vigas cargadoras (Stamm, 2000). ..	217
Figura 6.44. Curvatura natural de los culmos de guadúa para formar cerchas con vigas cargadoras (Stamm, 2000). .....	217
Figura 6.45. Prefabricación de una cercha, se observan uniones, vigas compuestas y columnas (Stamm, 2000).....	218
Figura 6.46. Unión de una viga inferior con un viga de carga principal (Stamm, 2000). .....	219
Figura 6.47. Unión de una viga inferior con un viga de carga principal (Stamm, 2010).....	219
Figura 6.48. Prefabricación de barandales (Stamm, 2000). .....	220
Figura 6.49. Unión del centro del barandal mediante tres varillas (Stamm, 2000)..	220
Figura 6.50. Unión de diagonales a vigas cargadoras (Stamm, 2010). .....	221
Figura 6.51. Unión de diagonales a vigas cargadoras (Stamm, 2010). .....	221
Figura 6.52. Colocación de las vigas de piso, de carga y de techo en forma de sánduche (Stamm, 2000). .....	222
Figura 6.53. Colocación de la cercha para el levantamiento mediante grúa (Stamm, 2000).....	223
Figura 6.54. Aseguramiento de la grúa a la cercha (Stamm, 2000). .....	223
Figura 6.55. Levantamiento de la cercha mediante la grúa (Stamm, 2000).....	224
Figura 6.56. Montaje de la cercha (Stamm, 2000). .....	224
Figura 6.57. Montaje de la cercha (Stamm, 2000). .....	225

Figura 6.58. Piso con estructura de GAK (NEC-11 N. , 2013). .....	226
Figura 6.59. Loseta de hormigón con malla electrosoldada (NEC-11, 2013).....	227
Figura 6.60. Loseta de hormigón con malla electrosoldada, puente Santa Fé (Stamm, 2010).....	227
Figura 6.61. Latillas de culmos de GAK para acabados del piso (NEC-11, 2013). 228	
Figura 6.62. Latillas de culmos de GAK, puente Bogotá (Stamm, 2010). .....	229
Figura 6.63. Entablado de madera (Grupo Andino, 1984).....	230
Figura 6.64. Entablado de madera, Puente Bogotá (FUNDEGUADUA A. , 2010).230	
Figura 6.65. Estructura de soporte. Cercha simple formada por culmos de GAK (Hidalgo, 1998). .....	232
Figura 6.66. Estructura de soporte. Cercha simple de madera (Stamm, 2010).....	232
Figura 6.67. Cubierta de teja (Hidalgo, 1998). .....	233
Figura 6.68. Cubierta de teja en puente Santa Fe (Stamm, 2010).....	233
Figura 6.69. Cubierta vegetal de Cade, puente El Bolero (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	234
Figura 6.70. Cubierta vegetal de Cade, puente San Plácido, Manabí (Fuente: Autor, 2014).....	234
Figura 6.71. Ajuste de pernos con taladro (Stamm, 2010).....	235
Figura 6.72. Limpieza de hongos en GAK, como parte del mantenimiento (FUNDEGUADUA A. , 2010).....	236

## RESUMEN

En el presente trabajo se validó un puente de *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK) de 20 metros de luz y se elaboró una metodología para su construcción. Se detallaron procesos de inmunización, propiedades físicas, propiedades mecánicas y esfuerzos admisibles de la GAK. Para obtener las deflexiones y aceleraciones en los puntos de interés del puente de GAK ubicado en la hacienda “Las Delicias”, se realizaron ensayos experimentales de carga estática y dinámica, respectivamente. En base a los acelerogramas se aplicó el artificio de la Transformada Rápida de Fourier (del inglés FFT) para obtener el periodo de vibración de la estructura. Se generó un modelo analítico en SAP 2000, a partir de los datos obtenidos en la visita de campo al puente de GAK. El modelo analítico partió de la geometría encontrada en el puente, se aplicaron cargas semejantes a las de los ensayos, se generaron funciones periódicas emulando la aplicación de las cargas dinámicas. El análisis modal de la estructura brindó un periodo de vibración y un esquema de deformación. Finalmente, las deflexiones y periodos de vibración oscilatoria resultantes de los ensayos experimentales fueron comparadas con las teóricas del modelo analítico, validándose el uso del puente para solicitaciones mínimas y depreciándose para solicitaciones mayores y un uso diferente al actual. Se incluye también una metodología para la construcción de un puente de GAK, con preparativos iniciales, requisitos de la guadúa previo a su uso estructural, requisitos de la infraestructura y la superestructura, tipos de uniones, elementos compuestos, y mantenimiento del puente.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **GUADÚA**
- **VALIDACIÓN**
- **ENSAYOS EXPERIMENTALES**
- **FFT (TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER)**
- **METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN**

## **ABSTRACT**

In the present work a bridge of Guadua Angustifolia Kunth (GAK) of 20 meters length got validated and a methodology for its construction was developed. Immunization processes, physical properties, mechanical properties and allowable stresses of the GAK were detailed. For deflections and accelerations at points of interest from GAK bridge located in the farm "Las Delicias", experimental testing static and dynamic load respectively were conducted. Accelerograms based on the artifice of the Fast Fourier Transform (FFT English) was applied for the period of vibration of the structure. An analytical model is generated in SAP 2000, from data collected in the field trip to the bridge of GAK. The analytical model was based on the geometry found in the bridge, similar to those assays loads were applied, were generated periodic functions emulating applying dynamic loads. The modal analysis of the structure provided a vibration period and an outline deformation. Finally, deflections and vibrations resulting oscillatory periods of the experiments were compared with theoretical analytical model, validating the use of the bridge and minimum stresses greatest stresses and depreciating for a different current use. It also includes a methodology for the construction of a bridge GAK, with initial preparations, the requirements prior to their structural use, infrastructure requirements and superstructure, types of joints, composite parts, and maintenance of the bridge guadúa.

### **KEYWORDS:**

- **BAMBOO**
- **VALIDATION**
- **EXPERIMENTAL TEST**
- **FFT (FAST FOURIER TRANSFORM)**
- **METHODOLOGY FOR CONSTRUCTION**

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E IMPORTANCIA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los puentes peatonales a base de *Guadúa angustifolia kunth* (GAK) en el Ecuador han sido construidos de manera artesanal, carentes de diseño, sin técnicas específicas de construcción ni planes de mantenimiento. Debido a que actualmente la Norma Ecuatoriana de la Construcción no cuenta con un capítulo sobre estructuras de guadúa, la cual debería incluir especificaciones y requisitos del material (GAK), normas de diseño estructural y de construcción.

Debemos mencionar que el Instituto Ecuatoriano de Normalización, cuenta con una guía de práctica, BAMBÚ CAÑA GUADÚA RECOMENDACIONES PARA EL USO EN LA CONSTRUCCIÓN que data del año de 1976; sin embargo los módulos de elasticidad y métodos de construcción de este documento son caducos.

Muchas poblaciones rurales tienen limitaciones para su movilización debido a los accidentes geográficos, y la construcción de puentes peatonales convencionales requiere de recursos humanos y materiales que difícilmente tienen acceso hacia estas zonas rurales.

La *Guadúa angustifolia kunth* (GAK) está limitada a construcciones informales de tipo marginal, o simplemente es utilizada en estructuras temporales como casas de guardianía, siendo desprestigiada como un potencial elemento en estructuras como puentes, cúpulas y cubiertas.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El GAK es endémico de algunos países latinoamericanos incluyendo el Ecuador, donde las condiciones medioambientales son óptimas para el cultivo de esta planta, lamentablemente su potencial de cultivo no es aprovechado al máximo debido a la falta de conocimiento de los usos y aplicaciones de esta gramínea. El desarrollo del presente trabajo dará a conocer las ventajas de la aplicación del GAK en la construcción, lo cual impulsará una mayor producción, y a su vez podrá ser exportado a nivel mundial por su creciente demanda.

Es indispensable la elaboración de una metodología para la construcción de puentes peatonales a base de la caña guadúa (nombre científico *Guadúa Angustifolia Kunth*, abreviación GAK) pues requiere conocimientos específicos y planes de mantenimiento para una mayor vida útil de la obra.

Al no contar con normas técnicas de material, constructivas y estructurales sobre la GAK, el proceso constructivo en el año 2003 sobre el puente peatonal de la hacienda “Las Delicias” fue más bien artesanal por lo que la evaluación del puente después de 12 años de uso sin mantenimiento es imperativa para la comunidad de San Placido.

El desconocimiento de los métodos de preparación de la GAK para potenciar su resistencia y flexibilidad, así como el desconocimiento de sus propiedades físicas, mecánicas y sismorresistente, hace que no sea considerado como un elemento estructural de construcción, por ello el desarrollo de trabajos como el presente brindará una base de datos de gran apoyo académico direccionado al diseño de estructuras a base de caña.

Los materiales de construcción convencionales, a más de su elevado costo, en la mayoría de los casos tienen un alto impacto sobre el medio ambiente, siendo necesaria la utilización del GAK para reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

En las zonas rurales del Ecuador existen comunidades aisladas por redes fluviales, estas comunidades podrán conectarse mediante puentes peatonales a base de GAK que resultarían fáciles de construir por los propios habitantes, simplemente con la aplicación de la metodología que se desarrollará en este trabajo.

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **Objetivo general del proyecto**

Elaborar de una metodología para la construcción de un puente peatonal en caña guadúa, como resultado del análisis de una aplicación práctica

#### **Objetivos específicos del proyecto**

- Detallar las generalidades, propiedades físicas, propiedades mecánicas, y los esfuerzos admisibles de la GAK.
- Realizar ensayos con carga estática y dinámica en el puente de GAK ubicado en la hacienda “Las Delicias” para obtener datos específicos del proyecto evaluado.
- Procesar los datos de los ensayos en campo hasta obtener información explícita del comportamiento de la estructura de GAK.
- Generar un modelo analítico, en el programa computacional SAP 2000 V17.0, a partir de la información obtenida en los ensayos de campo.
- Comparar resultados teóricos (modelo analítico) y prácticos (ensayos experimentales).

- Recomendar las técnicas constructivas más favorables para construcción de puentes peatonales de GAK con el fin de garantizar una vida útil prolongada.
- Realizar comentarios, criterios, evaluaciones y recomendaciones para un diseño óptimo de los puentes peatonales de GAK.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 GENERALIDADES DE LA GUADÚA ANGUSTIFOLIA KUNTH

Las especies de GAK tienen una denominación diferente en toda América según el país donde se encuentre, en Colombia lleva el nombre de guadúa, en Perú marona o taca, en Argentina tacuara, en Bolivia Tacuarembó y en Brasil taboca.

En Ecuador se la denomina caña guadúa, el cual es una gramínea de tallo leñoso, que se presenta como intermedia entre las maderas y las plantas fibrosas. Este recurso forestal no ha sido valorado como tal, por falta de una cultura de manejo orientada a la industrialización, sin aprovecharlo en su totalidad (Galvis & Rodríguez, 2007).

#### Clasificación Taxonómica

La caña guadúa (Figura 2.1), cuyo nombre científico es *Guadúa angustifolia kunth*, es una de las especies con mayor demanda por parte del sector productivo y tiene un alto potencial para la construcción (Botero, 2013).



**Figura 2.1.** Fotografía de la caña guadúa (*Guadúa angustifolia kunth*) (Stamm, 2010).

La caña guadúa es un bambú americano, fue recolectada en 1783 por José Celestino Mutis en la Real Expedición Botánica, luego en 1806 fueron colectados y estudiados especímenes por Humbolt y Bonpland quienes la encontraron en su viaje a América en el río Casiquiare en Venezuela y en la Cordillera de los Andes en Colombia por el camino que conduce de Santafé de Bogotá a la zona cafetera. Estos botánicos incluyeron a esta gramínea gigante americana dentro del género *Bambusa* del Asia que era el género que ellos conocían antes de viajar al Nuevo Mundo. Posteriormente, en 1822 el botánico Alemán Karl Sigismund Kunth estudia con más profundidad esta planta, con lo cual encuentra que sus características son diferentes a los bambús asiáticos y crea el género *Guadúa*, haciendo uso del vocablo “guadúa” empleado por las comunidades nativas de Colombia y Ecuador (Botero, 2013).

La taxonomía vegetal es la ciencia que describe, nombra y clasifica las plantas. En base a esta definición, la caña guadúa pertenece a la familia *Poaceae*, a la sub-familia *Bambusoideae* y al género *Guadúa*. Existen 41 géneros y 451 especies de bambúes en América latina, de las cuales 30 especies corresponden a caña guadúa (Londoño, 2002).

### **Origen y distribución**

La guadúa es originaria de América, se distribuye desde los 23° de Latitud Norte en San Luis de Potosí, México, hasta los 35° de Latitud Sur en Argentina. Crece en todos los países de América Latina con excepción de Chile y las Islas Caribe, pero ha sido introducido con éxito en Puerto Rico, Cuba, Haití y Trinidad (Botero, 2013).

Esta especie se encuentra naturalmente en Colombia, Ecuador y Venezuela. En Colombia existen 54000 hectáreas de guaduales (conjunto de guadúas). En Ecuador existen aproximadamente 15000 hectáreas de caña guadúa, pero estas comunidades han quedado como residuo de grandes extensiones de guaduales principalmente en el Sur de Manabí y Norte del Guayas (Botero, 2013).

## 2.2 MORFOLOGÍA DE LA GAK

Las guadúas son plantas con una gran diversidad morfológica; las hay de pocos centímetros y tallos herbáceos hasta guadúas de 30 metros de altura y tallos leñosos. Las estructuras de mayor importancia morfológica son el rizoma, culmo, yema, hoja caulinar y follaje (Londoño, 2002).

### **Raíces**

Está conformado por raíces adventicias y fibrosas que pueden alcanzar profundidades hasta de 1,50 metros, parte de ellas se profundizan y las demás se extienden horizontalmente (Figura 2.2). Posee rizomas correspondientes a modificaciones del tallo que crecen hacia fuera (paquimórfico), en su conjunto son fuertes, abundantes y la activación de las yemas genera nuevos rizomas y por ende nuevos tallos (Figura 2.3) (Londoño, 2002).



**Figura 2.2.** Raíces de la caña guadúa (GAK) (Narvárez, 2013)

### **Tallo**

También llamado culmo, es un tallo definitivo que en su etapa madura alcanza una altura entre 15 y 25 metros. Tiene forma cilíndrica con entrenudos huecos llamados canutos, separados de manera transversal por nudos que le brindan resistencia, rigidez

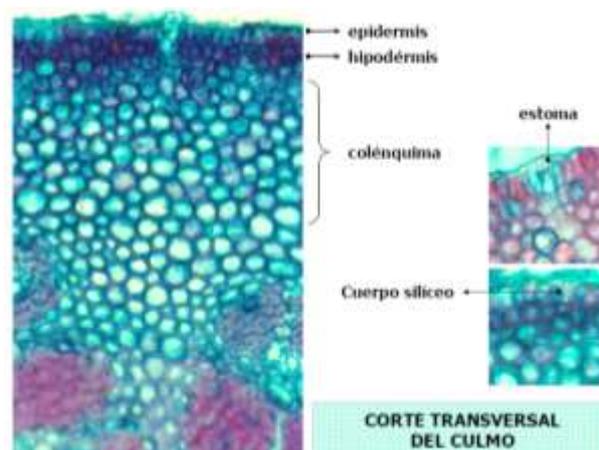
y flexibilidad. El tallo es leñoso, recto ligeramente arqueado en la punta (Figura 2.3) (Cobos & León, 2007).



**Figura 2.3.** Partes del tallo de un GAK (Stamm, 2010).

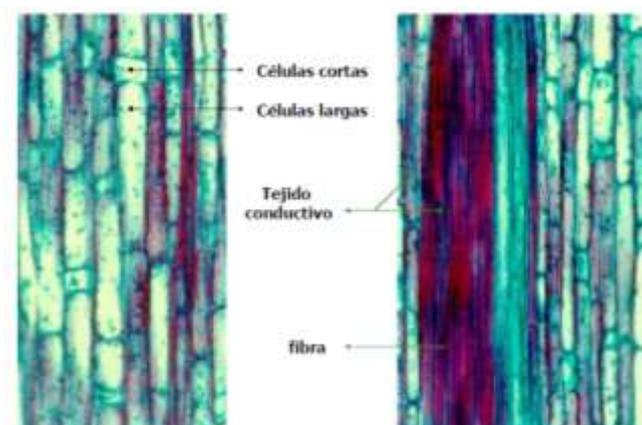
El tejido del culmo o tallo está compuesto por:

- a) Corteza: es la parte externa del culmo y sus funciones son prevenir la pérdida de agua y proteger al tejido. La corteza está compuesta por epidermis e hipodermis. La alta concentración de cuerpos silíceos en la epidermis del culmo de la GAK contribuye a la dureza de su madera (Figura 2.4) (Londoño, 2002).



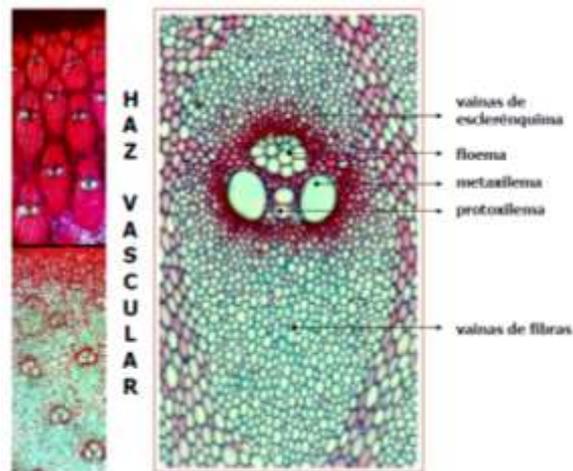
**Figura 2.4.** Corte transversal del culmo de la GAK (Londoño, 2002).

- b) Parénquima: en un corte longitudinal del culmo, el parénquima está compuesto por células largas y células cortas, las primeras tienen paredes más gruesas mientras que las segundas tienen las paredes más pequeñas y de forma cúbica. La función de estos dos tipos de células aún debe ser investigado. En la Figura 2.5 se observan las células largas y cortas del parénquima en un corte longitudinal del culmo de la GAK (Londoño, 2002).



**Figura 2.5.** Corte longitudinal del culmo de la GAK (Londoño, 2002).

- c) Haces vasculares: un haz vascular es cada uno de los cordones individuales que forman el sistema vascular primario de las plantas, cuya función es la de transportar a través de la planta agua, sales minerales disueltas y nutrientes. Cada haz vascular está compuesto por metaxilema, protoxilema, floema y por vainas de esclerénquima y de fibras (Figura 2.6) (Londoño, 2002).

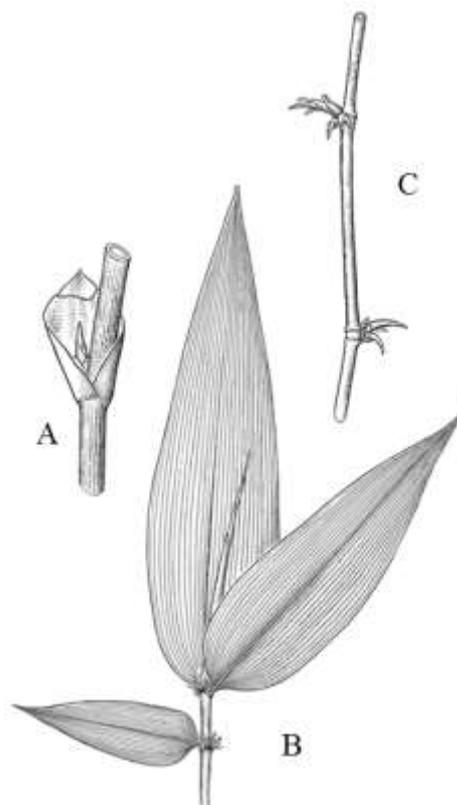


**Figura 2.6.** Haz vascular de GAK (Londoño, 2002).

- d) Fibras: son células largas y poligonales que pertenecen al esclerénquima, un tejido de sostén formado por células muertas a la madurez con paredes engrosadas y endurecidas. Proporcionan gran resistencia defensiva contra los ataques de los insectos (Figura 2.5) (Londoño, 2002).

## Hojas

Posee dos tipos de hojas, caulinares y del follaje. Las primeras son de color marrón o café claro, tienen forma triangular, son lisas y fuertes, con pelillos en sus partes exteriores y lustrosos en su interior; estas hojas protegen al tallo y sus yemas desde el nacimiento y se desprenden del culmo cuando salen las ramas que brotan de las yemas. Las hojas de follaje son verdes, de forma lanceolada y lisa, angosta y larga, con una longitud entre 8 y 20 cm, y ancho entre 1,5 y 3,5 cm (Figura 2.7) (TENECHE, 2007).



**Figura 2.7.** Morfología de las hojas del GAK. **A**, hojas caulinares. **B**, hojas del follaje. **C**, fragmento de la GAK con nudos y hojas caulinares (TENECHÉ, 2007).

## Flor

La floración de la GAK es compleja, con flores pequeñas de color violáceo o rosáceo, son bisexuales y se agregan de manera diferente en lo que se llama espiguetes, que agrupados constituyen la inflorescencia (forma en la que se organizan las flores). Su vida es corta, aproximadamente 48 horas y está ubicada en las partes terminales de las ramas superiores (Figura 2.8) (Cobos & León, 2007).



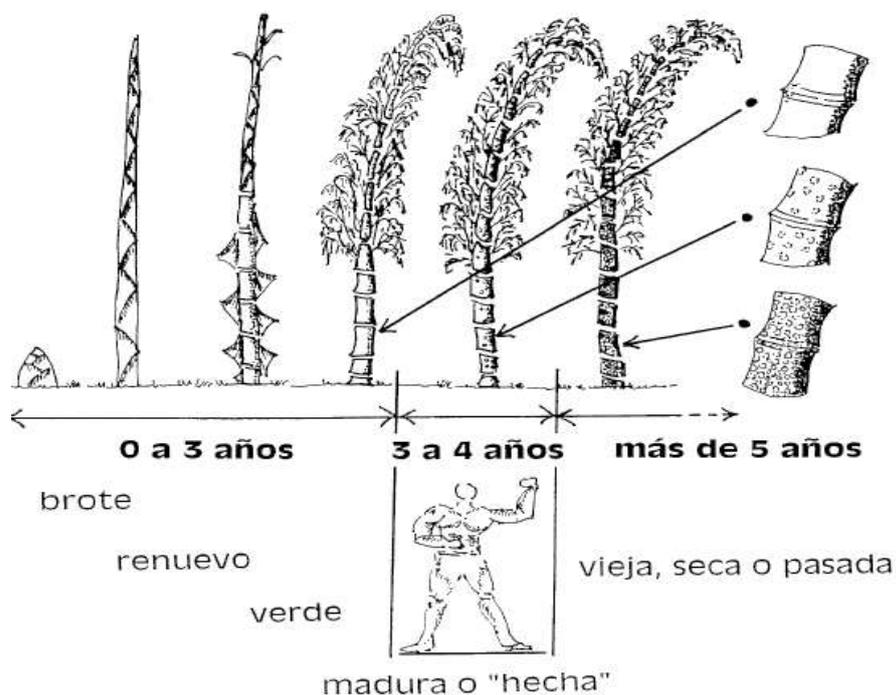
**Figura 2.8.** Inflorescencia de GAK (Narváez, 2013)

### **Semillas**

Los frutos maduros contienen uno o más semillas similares a la de la mayoría de las gramíneas. Los bambúes leñosos requieren un mínimo de hasta siete años desde su propagación para producir semillas, y de 2 a 4 años para su maduración (Cobos & León, 2007).

### **2.3 FASES DE CRECIMIENTO**

La GAK es una especie de crecimiento muy rápido que logra crecer hasta 11 centímetros al día y alcanza una altura definitiva de 18 a 30 metros en los primeros 6 meses después de emerger del suelo. Tiene cuatro fases de desarrollo o crecimiento, como se observa en la figura 2.9 (Botero, 2013).



**Figura 2.9.** Fases de crecimiento de la GAK (Tandazo & Flores, 2012)

A continuación se describen cada una de las fases de crecimiento:

### **Fase Renuevo**

Es la primera fase de desarrollo de la planta. El brote está cubierto por hojas caulinares de color café, que le brinda protección en su crecimiento inicial. Al estirarse los nudos se forman los entrenudos, creciendo de manera longitudinal de abajo hacia arriba. Esta fase dura en promedio 6 meses (Botero, 2013).

### **Fase Joven o viche**

Luego de la fase de renuevo las yemas laterales se activan para dar paso a las ramas lo que provoca el desprendimiento de las hojas caulinares y dejando el tallo descubierto y de color verde intenso. En esta fase el culmo no tiene resistencia físico-mecánica ya que se encuentra en estado verde, alto en azúcares y almidón. La fase joven puede durar hasta dos años luego del brote. (Botero, 2013)

### **Fase Madura**

El culmo pierde su color verde intenso, adquiriendo una coloración verde opaca y aparecen manchas de color blanco-grisáceo en el tallo, indicativo de que ha entrado en fase madura óptima para su cosecha. En esta fase la planta adquiere resistencia físico-mecánica. El estado de madurez puede durar de 3 a 5 años dependiendo de las condiciones climáticas del lugar donde se desarrolla (Botero, 2013)

### **Fase Seca**

Los tallos se tornan de color amarillento a rojizo, el follaje se seca y pierde su resistencia. Se encuentra en estado de envejecimiento o degradación. Las guadúas en este estado impiden la aparición de nuevos brotes por falta de luz, espacio, nutrientes y agua. (Botero, 2013)

## **2.4 CALIDAD DEL SUELO PARA SIEMBRA DE LA GAK**

La calidad de los productos derivados de la GAK depende directamente de la calidad de la pieza de guadúa, materia prima de los mismos, que a su vez está relacionada con la calidad del sitio en donde se encuentra el guadúal.

La evaluación de la calidad se ha realizado tradicionalmente por medios visuales, los cuáles no dan una idea precisa y confiable de la calidad de la misma. No se han tenido en cuenta las características del sitio de donde proviene el material, las cuáles pueden proporcionar al mismo, propiedades físicas, mecánicas y morfológicas que son importantes según la utilización y transformación que se efectúe al producto en cada uno de los mercados de la guadúa (Botero, 2013).

Entre las características del suelo más favorables para mejorar la calidad dendrométrica de la caña guadúa, los guadúales ubicados en:

- Zonas entre 900 y 1200 m.s.n.m. el 59% del guadúal, o por encima de 1500 m.s.n.m. para mejorar sus propiedades físico-mecánicas.
- Por lo general en valles
- Suelos con promedios bajos de densidad aparente (5-10 cm).
- Promedios menores en cuanto a pH y presencia de Potasio, y promedios mayores en cuanto a presencia de Aluminio, en relación con los promedios de los otros grupos (Botero, 2013).

Entre las características ambientales favorables para mejorar la calidad dendrométrica de la caña guadúa, están:

- Zonas con temperaturas entre 19 y 22 °C.
- Precipitación anual superior a 1300 milímetros.
- Humedad relativa del 80%. El suelo para la siembra deberá ser profunda y suelta, con buen drenaje y fértil, deberá ser de tipo areno-limoso o arcilloso (Botero, 2013).

Para la siembra de la GAK, la distancia de siembra debe ser de 5 x 5 metros, con un plateo de 1,5 metros y un hoyo de 40 x 40 centímetros para cada planta (Botero, 2013).

## **2.5 RÉGIMEN DE APROVECHAMIENTO DE LA GAK**

El ciclo y la intensidad del corte son factores importantes en el aprovechamiento del guadúal, lo cual en conjunto se conoce como Régimen de aprovechamiento. Para evitar la reducción de la producción de los culmos y la degeneración de la calidad del guadúal, se debe realizar una explotación sistemática y regular lo cual estimula la regeneración natural de los culmos y por ende su producción (Botero, 2013).

La densidad y los grados de madurez del guadúal deben conocerse antes del aprovechamiento. En general se recomienda una intensidad de corte de culmos hasta máximo 40% con períodos de 12 a 18 meses para un mismo sitio, dependiendo de la capacidad de regeneración del cultivo (Botero, 2013).

Una vez determinado del régimen de aprovechamiento, la cosecha se realiza en cuarto menguante después de la luna llena, teniendo un período de corte de siete días y de 3 a 6 de la mañana. La cosecha inicia con la eliminación de las ramas laterales, vegetación asociada a menos de 2 metros de altura y guadúa seca. Encima del primero o segundo nudo se realiza el corte de la caña (o aproximadamente de 15 cm a 30 cm del suelo), de forma que el agua no forme depósito y evitar que el rizoma se pudra. El corte debe ser lo más limpio posible, para lo cual deben utilizarse machetes (Botero, 2013).

Tomar en cuenta que para el corte de la guadúa madura se utiliza el método de entresaca selectiva para una mejor renovación del suelo (Mendez & Palominos, 2005), que consiste en no cortar muchas cañas del mismo sitio ni dejar muchos tallos maduros en un solo sitio (Botero, 2013).

## **2.6 PATOLOGÍA Y PRESERVACIÓN DE LA GAK**

Para aprovechar al máximo las propiedades físicas y mecánicas de la GAK, así como aumentar la durabilidad del material y obtener protección contra insectos y hongos, es imprescindible realizar una preservación, tratamiento y/o inmunización de la GAK antes de su uso como material de construcción (Mendez & Palominos, 2005).

Una mejor comprensión del proceso de preservación requiere el conocimiento de los aspectos morfológicos de la GAK así como un buen régimen de aprovechamiento, revisados en el anterior capítulo (Mendez & Palominos, 2005).

Antes de entrar en detalle con los diferentes métodos para preservación e inmunización de la GAK, se estudiarán los principales insectos y hongos que atacan al GAK, así como los factores que influyen la tratabilidad y preservación de los culmos (Mendez & Palominos, 2005).

### 2.6.1 Biodegradación por insectos y hongos

Los hongos son los mayores invasores de la GAK, seguido por los insectos que deterioran significativamente al culmo (Mendez & Palominos, 2005).

#### **Insectos**

Las construcciones pueden ser atacadas por insectos, el más común es el escarabajo de la madera, reduciendo el tejido a un polvo tipo harina.

El ataque de larvas como el *Dinoderus minutus* (Figura 2.10) depende de la cantidad de almidón y carbohidratos solubles en el parénquima y están presentes preferiblemente en el interior del culmo, mientras que la parte externa más fibrosa es principalmente dañada por medios mecánicos como el roer (Cobos & León, 2007).



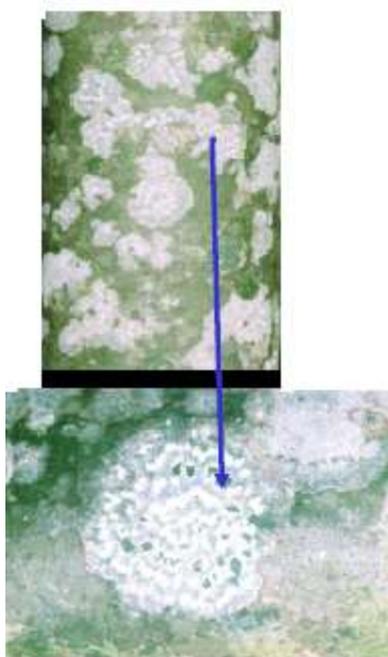
**Figura 2.10.** *Dinoderus minutus* (plaga de GAK) (Silva, 2008)

En bambús con paredes gruesas, como la GAK, las larvas pueden demoler el almidón del tejido interno y salir sin mucho daño estructural porque el grueso tejido

fibroso del exterior mantiene su resistencia. Debido a que las características de la GAK son muy similares a la madera, las termitas son las más destructivas y temidas, puesto que su acción puede ser devastadora hasta en grandes estructuras como las vigas de GAK (LANDAURO, 2010).

### **Hongos**

Los hongos pueden causar decoloración y decaimiento, el contenido de humedad y oxígeno para respirar son sus requerimientos suficientes para vivir, así que la GAK con una humedad inferior al 20% estará “protegido”. Los mohos coloridos están confinados a la superficie y se nutren de las impurezas, no pueden penetrar y degradar el culmo, pero pueden causar manchas superficiales (Figura 2.11) (LANDAURO, 2010).



**Figura 2.11.** Hongos en el Culmo de GAK (FUNDEGUADUA, 2010)

Los hongos de mancha azul pueden penetrar el culmo con sus hifas pigmentadas y usar el almidón en el parénquima, estos hongos no tienen enzimas para degradar la pared celular y por tanto no pueden degradar el tejido (LANDAURO, 2010).

El hongo verdaderamente destructivo crece en la lumina celular, puede degradar celulosas y hemicelulosas con liberación de lignina (produciendo una putrefacción de color café) o bien puede degradar todas las sustancias de las paredes produciendo una putrefacción de color blanca (LANDAURO, 2010).

La GAK es principalmente atacada por hongos que producen putrefacción blanca, por ejemplo el *Schizophyllum commune*, los signos de ataque por hongos de este tipo son el cambio ligero de color, pérdida de peso y las propiedades de resistencia bastante reducidas. Por lo general los signos de decaimiento de la planta son pasados por alto (LANDAURO, 2010).

### **2.6.2 Factores que influyen la tratabilidad y preservación de los culmos**

La baja durabilidad de GAK en un ambiente expuesto a menudo requiere el uso prolongado de conservantes que contienen químicos. El conservante debería ser introducido en la estructura del culmo tan profundo y uniforme como sea posible, este proceso está influenciado por los siguientes factores: la tratabilidad del culmo de GAK, su contenido de humedad, el tipo de conservante y el proceso de preservación aplicado (LANDAURO, 2010).

#### **Factores anatómicos**

La tratabilidad de los tejidos de GAK es bajo, debido a su estructura anatómica que la hace considerablemente más resistente a la penetración en comparación a la madera (Londoño, 2002).

Como se vio en la sección 2.2, el interior y exterior del culmo está cubierto por capas confinadas de células especiales. La parte externa, la corteza, consiste en células densamente empacadas, a menudo cutinizadas y con un revestimiento ceroso, que le provee un sello hermético necesario para la vida del culmo y prevenir cualquier pérdida de agua. También obstaculiza cualquier otra recepción de líquidos, por tanto, restringe la aplicación de tratamientos simples como el remojo (Londoño, 2002).

Los líquidos corren fácilmente por la corteza cerosa. La parte externa raramente es raspada, lo cual puede acelerar el secado y provee una mejor adhesión de pinturas (Londoño, 2002).

### **Constituyentes químicos de las células en la GAK**

Las células en la GAK están constituidas por ~50% de celulosa, ~25% de hemicelulosa y ~25% de lignina, muy similar a la madera. Sin embargo, la GAK no produce componentes tóxicos al envejecer. Su durabilidad natural contra la biodegradación es generalmente bastante baja (Londoño, 2002).

El contenido de sílice (0,5-4%) no tiene impacto alguno, lo importante es la presencia de un componente fortificante llamado almidón, el cual es almacenado como fuente de energía en las células del parénquima. Una cantidad de 2-6%, o mayor a 10% es influenciada por la edad y altura del culmo, pero más decisivamente por la estación del año. Además, los culmos floreados ya no contienen almidón (Londoño, 2002).

### **Contenido de humedad**

En el tejido del culmo la cantidad de humedad tiene una influencia decisiva en la resistencia biológica, la tratabilidad y por tanto en el efecto de protección. El contenido de humedad es determinado por la cantidad de agua dentro de la lúmina celular, especialmente en las vesículas, y el agua que está confinada en las paredes de las células (LANDAURO, 2010).

El contenido de humedad de un culmo verde varía entre 60 y 140%, depende de la especie, así como de la edad, la altura del culmo y la estación del año. Los culmos más jóvenes tienen una humedad por encima del 100%, lo más viejos entre 60 y 90%. Dentro del culmo, las partes más bajas tienen mayor humedad que las partes más altas, relacionado con la cantidad de parénquima presente (LANDAURO, 2010).

Lo más importante es la influencia estacional, donde la humedad es más baja durante los meses secos que durante las estaciones lluviosas, con diferencias entre 50 y 100% (LANDAURO, 2010).

Cuando toda el agua líquida se ha evaporado, se dice que alcanza el “punto de saturación de la fibra” en aproximadamente 20% de humedad (LANDAURO, 2010).

Durante su primeros 3-4 años el culmo sufre un proceso de maduración, donde algunas estructuras cambian y consecuentemente sus propiedades y utilización. Un culmo “inmaduro” de un año tiene paredes celulares de fibras finas y parénquima con un contenido bajo de lignina, además las células no contienen almidón. Durante los siguientes años las fibras y las células del parénquima exhiben un engrosamiento de sus paredes y una subsecuente lignificación (Londoño, 2002).

Las células del parénquima son llenas de almidón como fuente de energía para los siguientes años. El engrosamiento de las paredes de las fibras puede continuar hasta más de 10 años. La senescencia de los culmos viejos afecta la eficiencia funcional bloqueando las vesículas que conducen agua, lo cual dificulta la tratabilidad (Londoño, 2002).

### **2.6.3 Técnicas de Preservación de la GAK**

El término “Preservar” significa conservar, proteger contra. Diferentes métodos desde los más tradicionales hasta los más sofisticados son adaptados por el hombre con alta efectividad pero con posibles daños al medio ambiente y la salud del hombre (Montoya, 2008).

Sin embargo, para la aplicación de conservantes existen diversos sistemas que incluyen desde el empleo de modernos equipos de calderas y cámaras de vacío y presión hasta los métodos naturales y sistemas de silvicultura (Montoya, 2008).

### Requerimientos técnicos de la GAK para su preservación

Las estructuras con guadúa deben preservarse ante agentes nocivos: insecto, hongos, incendios, sol y lluvia, sismos y el paso del tiempo. Entre las recomendaciones técnicas generales para la preservación de la GAK están (GAHONA, 2007):

- Edad estimada entre 3 y 5 años, es decir, debe estar madura.
- Culmos sanos y parejos con diámetros y distancia entre nudos similares (Figura 2.12). Con una diferencia entre los diámetros de la base y la punta no mayor a 1 cm.



**Figura 2.12.** Culmos de GAK parejos con distancia entre nudos similares (Londoño, 2002).

- Culmos secos e inmunizados, como se observa en la Figura 2.13.



**Figura 2.13.** Culmos secos e inmunizados de GAK (Londoño, 2002).

- Los productos utilizados para su preservación deben ser eficaces y no tóxicos (Figura 2.14).



**Figura 2.14.** A la izquierda, culmos con conservantes ineficaces. A la derecha, químico tóxico para el ambiente (Londoño, 2002).

#### **2.6.4 Condiciones que debe cumplir la técnica de preservación de la GAK**

La preservación de la GAK la protege del ataque de hongos e insectos. La técnica utilizada para su preservación debe cumplir con algunas condiciones:

- Los tejidos de la GAK no deben ser afectados por la composición del agente utilizado, para evitar la disminución de sus propiedades físicas y mecánicas.
- Un agente líquido tendrá mayor facilidad de penetración en todas las áreas de la GAK.
- No debe ser fácilmente volátil, para evitar su respiración dentro de las construcciones.
- Los agentes activos impedirán el crecimiento de microorganismos e insectos en el interior y exterior de la GAK.
- El tratamiento de preservación no deberá alterar las características físicas especialmente el color de la guadúa (Londoño, 2002).

El proceso de preservación de la GAK inicia con el curado seguido del secado. A continuación se detallan las técnicas de curado y secado.

### **2.7.1 Técnicas de curado**

Las técnicas de curado consisten en la expulsión de la sabia de la caña para disminuir el ataque por insectos y hongos, estas técnicas deben ser aplicadas inmediatamente después de cortar la mata (Londoño, 2002).

Existen varias técnicas de curado de la GAK:

- Curado en la mata
- Curado por inmersión en agua
- Curado por calentamiento
- Inmersión con solución de ácido bórico y bórax
- Inyección con solución de ácido bórico y bórax
- Método Boucherie
- Método Boucherie modificado

- Preservación con humo (en horno vertical y horno horizontal)

### **Curado en la mata**

En esta técnica los culmos son cortados en la base manteniendo aún las ramas y hojas intactas, luego son colocados sobre una superficie aislada del suelo y apoyados contra las guadúas vecinas (Figura 2.15) por un tiempo entre 4 y 8 semanas. Mientras la transpiración por las hojas y la respiración por el parénquima continúa, el contenido de humedad y almidón se reduce, haciéndolo menos atractivo para los insectos (Cobos & León, 2007).



**Figura 2.15.** Técnica de curado en la mata. Culmos apoyados contra guadúas vecinas (Stamm, 2010).

Transcurrido entre 4 y 8 semanas, las ramas y hojas son cortadas y los culmos son dejados en un área cubierta y bien ventilada (Figura 2.16).



**Figura 2.16.** Técnica de curado en la mata. Culmos reposando bajo una cubierta seca y ventilada (Montoya, 2008)

Mientras está realizando la fotosíntesis, la GAK circula líquidos desde el suelo hasta las hojas, lo que significa que se llena casi completamente con agua. Además, el proceso de fotosíntesis continúa durante la noche por la luz de la luna. Así que para cortar la GAK con un nivel bajo de líquidos, el corte es realizado alrededor de las 4 de la madrugada con luna menguante o luna nueva (Cobos & León, 2007).

Si el corte es realizado en el día, el almidón se encuentra aún en las raíces y en el tallo hay más líquidos, aumentando el riesgo del ataque por insectos. La aplicación de este método es recomendable cuando se requieren tallos sin manchas y un color conservado (Cobos & León, 2007).

### **Curado por inmersión en agua**

Esta técnica es bastante sencilla y ampliamente adoptada para mejorar la resistencia contra el escarabajo de madera y hongos de mancha azul. Consiste en sumergir los culmos de la GAK en agua durante máximo cuatro semanas (Figura 17) (Cobos & León, 2007).



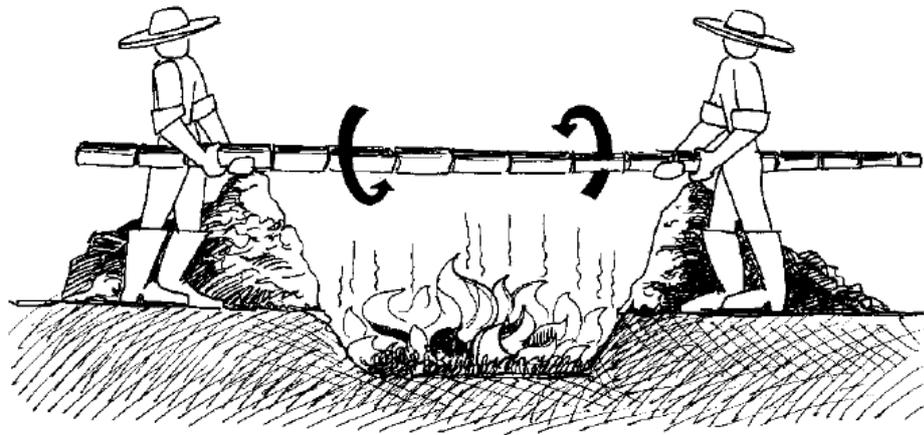
**Figura 2.17.** Curado por inmersión en agua (Silva, 2008).

La efectividad de esta técnica depende del tiempo que pueda permanecer sumergido hasta obtener su saturación máxima. En un período corto los culmos son mantenidos frescos, y se desplaza fácilmente la savia. En un período más largo el almidón es degradado y la permeabilidad es mejorada debido a la desintegración de las membranas por medio de las bacterias (Cobos & León, 2007).

La aplicación de esta técnica provoca manchas en la epidermis del culmo, y un tiempo prolongado sumergido en agua disminuye las propiedades físicas y mecánicas de la GAK (Cobos & León, 2007).

### **Curado por calor**

Debido a la susceptibilidad de la GAK a los hongos y al ataque de los insectos, el tratamiento con calor es uno de los tratamientos potenciales para mejorar la durabilidad y la estabilidad dimensional de la GAK (Figura 2.17) (Narváez, 2013).



**Figura 2.18.** Curado por calor (Tandazo & Flores, 2012).

Básicamente se remueve una buena cantidad de humedad y más importante aún, se cocinan los azúcares en el culmo volviéndolos más duros, enlazando las fibras y creando un culmo más fuerte (Narváez, 2013).

En este método los culmos cortados de la GAK son colocados sobre las llamas a una altura aproximada de 30 cm para evitar el contacto directo con el fuego. El resultado de las altas temperaturas a las que se someten los culmos es la protección contra hongos e insectos pero a su vez, genera cambios estructurales y propiedades mecánicas reducidas (Narváez, 2013).

#### **Inmersión con solución de ácido bórico y bórax**

Este método consiste en introducir la guadúa previamente agujerada por los tabiques (nudos de la guadúa) con una varilla puntiaguda de 12.7 mm (1/2"), en un tanque que contiene la solución de ácido bórico y bórax en relación 2:1 al 3%, dejamos reposar allí la guadúa en exposición prolongada por cuatro días, debido a que es el tiempo donde la guadúa deja de absorber la solución como se muestra en la figura 2.18 (Montoya, 2008).



**Figura 2.19.** Curado por Inmersión con solución de ácido bórico y bórax (Londoño, 2002).

### **Inyección con solución de ácido bórico y bórax**

El procedimiento es el siguiente: se perfora el canuto de la guadúa con 2 agujeros de 3.2mm (1/8”) o menor, cada uno cerca del tabique o nudo superior e inferior y se procede a inyectar la solución preservante de ácido bórico y bórax al 3% en cantidad suficiente que bañe las paredes internas; adicionando una cantidad que puede variar entre 10 ml y 20 ml de preservante para cada agujero (Figura 2.19) (Montoya, 2008).



**Figura 2.20.** Curado por Inyección con solución de ácido bórico y bórax (Silva, 2008).

### Método de Boucherie

Este método ideado por el Dr. M. Boucherie, el método Boucherie tradicional o también conocido como “por gravedad” data del siglo XVIII y se utilizaba para conservar madera de pino, consiste en un tanque abierto en su parte superior y un tubo metálico con una llave en su parte inferior, colocado a una altura que permitiera bajar el líquido preservante por gravedad, esta solución se conecta a un extremo del culmo de la guadúa por una sección de caucho (Figura 2.20), puede aplicarse también colocando verticalmente la guadúa y llenando su entre nudo superior con el preservativo, dejándolo en esta posición por algunas horas hasta que éste haya bajado a lo largo de su pared (Tandazo & Flores, 2012).



**Figura 2.21.** Método Boucherie “por gravedad” (Cobos & León, 2007)

### Método de Boucherie modificado con solución de ácido bórico y bórax

La modificación se realizó con el objetivo de simplificar el método Boucherie por gravedad y hacerlo comercialmente viable para el tratamiento a gran escala en bosques, reduciendo el proceso de varios días a unas pocas horas. Esto se logra con la adición de un compresor que inyecta el preservante a presión (10-15 libras) desde un recipiente herméticamente cerrado en sustitución al flujo por gravedad. El aire a presión asegura una mayor y más rápida penetración y absorción del preservante, y elimina el problema de colocar los bambúes verticalmente y la restricción de la longitud del culmo (Tandazo & Flores, 2012).



**Figura 2.22.** Método Boucherie modificado (Londoño, 2002).

El procedimiento consiste en reemplazar la savia de la guadúa por una solución de ácido bórico y bórax al 3%, con la ayuda del equipo de inyección mencionado anteriormente el recipiente hermético contiene la solución y el compresor ayuda a vencer la resistencia de la guadúa al paso del preservante. El proceso termina una vez la solución preservante ha reemplazado la savia de la guadúa (Montoya, 2008).

### **Método Boucherie modificado con ácido piroleñoso**

Utilizando el mismo equipo que en el método Boucherie modificado por presión (Figura 2.21), se reemplaza la savia de la guadúa por un subproducto de la combustión incompleta de material orgánico al condensarse llamado ácido piroleñoso. La guadúa es sometida a este proceso el tiempo suficiente para que el ácido piroleñoso reemplace la savia contenida en ella; además, se realiza una filtración previa para evitar que partículas de hollín sedimentadas obstruyan el sistema vascular de la guadúa (Montoya, 2008).

### **Preservación con humo (en horno vertical)**

El proceso de preservación con humo o ahumado consiste en quemar material orgánico como por ejemplo residuos de guadúa, madera, cascarilla de arroz o café en una combustión incompleta generando humo que penetra en la estructura de la guadúa, preservándola de los insectos.

La guadúa debe estar en confinamiento para permitir que el humo trabaje, las guadúas se perforan previamente con una varilla de media rompiendo los diafragmas para evitar rajaduras y lograr una mejor penetración del humo, además se ubica una chimenea por donde sale el exceso de humo (Figura 2.22). La temperatura debe mantenerse entre 52°C y 57°C durante las dos semanas del proceso. Los vapores condensados de este humo son el ácido piroleñoso que puede ser empleado para otros usos como: la agricultura, la ganadería, la piscicultura y hasta usos medicinales (Montoya, 2008).



**Figura 2.23.** Horno Vertical para secado con humo (Tandazo & Flores, 2012).

## **2.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GAK**

La GAK al ser utilizada en elementos de soporte estructural en forma de columna, viga, vigueta, pie derecho, entramados, entrepisos, etc. Cumplirá con ciertas propiedades físicas para ser valoradas en la construcción (NSR-10, 2010).

La GAK obtiene sus propiedades físico-mecánicas óptimas en la Fase de crecimiento conocida como Madura, mencionada anteriormente donde también se recomienda la cosecha de la GAK (Cobos & León, 2007).

### **2.7.1 Contenido de Humedad**

El contenido de humedad del culmo de GAK es una propiedad física que mantiene relación muy cercana con las propiedades mecánicas de la misma, por lo tanto el porcentaje de humedad debe establecerse en un rango idóneo para que así, el culmo tenga las propiedades mecánicas suficientes para ser valorada en la construcción (NSR-10, 2010).

En la naturaleza la humedad del culmo es inversamente proporcional a la edad y la altura del culmo de GAK, también influye la época de la cosecha si bien se realiza en temporada lluviosa el contenido será superior al de la época de sequía (Cobos & León, 2007).

Durante la reducción del contenido de humedad (CH) las contracciones en las dimensiones del culmo serán longitudinales y transversales, las del tipo longitudinal se pueden despreciar, pero la contracción del diámetro puede ser del 5% al 15%, una deformación importante, por este motivo los culmos deben llegar a un CH mínimo el cual ya no producirá contracciones en los culmos y se consideraran listos para la construcción (Cobos & León, 2007).

Al momento de realizar los ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas de los culmos se deberá seguir la Norma Técnica Colombiana, NTC 5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadúa *angustifolia kunth*”, para que los resultados no sean despreciados, todas las probetas

que se ensayen deberán tener un contenido de humedad homogéneo inferior al 19%, los resultados de las probetas con un  $CH > 19\%$  serán descartados (NSR-10, 2010).

Las guadúas para uso estructural no deberán sobrepasar 19% ni estar por debajo del 10%. El valor recomendado es el más cercano a la humedad de equilibrio ambiental (CHE) de la zona donde serán instaladas. Los valores de esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad de la Norma Colombiana de Construcción fueron elaboradas con culmos de GAK con un  $CH=12\%$  (NSR-10, 2010).

### **2.7.2 Masa por volumen**

Es una magnitud física escalar, referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia u objeto. La masa por volumen es como se denomina la densidad actualmente, la densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. (Cobos & León, 2007).

La propiedad de masa por el volumen es indispensable en el análisis estructural, al momento de establecer el peso propio de los elementos de la estructura conformados por culmos de GAK, en el sistema internacional la unidad de densidad es  $\text{kg}/\text{m}^3$  (NSR-10 R. C., 2010).

Para obtener los valores de masa por volumen de una muestra de GAK se deberá seguir la Norma Técnica Colombiana, NTC 5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadúa angustifolia kunth” (NSR-10, 2010).

En ensayos realizados en la escuela politécnica del ejército la densidad de los culmos ensayados se estableció en  $704.18 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Cobos & León, 2007), pero se debe recalcar que para la determinación del peso propio en el diseño estructural el reglamento colombiano de construcción sismorresistente recomienda  $800 \text{ kg}/\text{m}^3$  para la GAK (NSR-10, 2010).

### 2.7.3 Peso específico

Se conoce al peso específico como la relación que existe entre el peso de una sustancia y el volumen de la misma, y se puede simplificar como el producto de la densidad antes mencionada por la aceleración de la gravedad ( $g$ ) (Wikipedia.org, 2014).

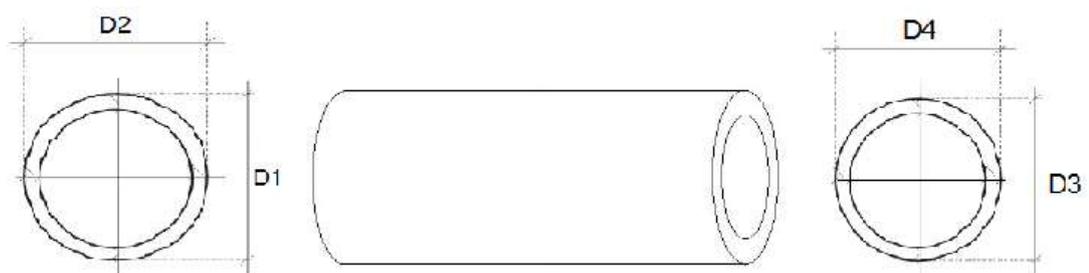
En el sistema técnico se mide en kilogramos-fuerza por metro cúbico ( $\text{kgf}/\text{m}^3$ ) el kilogramo fuerza representa un kilogramo de masa en la tierra, el valor de esta magnitud expresada en  $\text{kgf}/\text{m}^3$  será el mismo de la densidad (Wikipedia.org, 2014).

El valor del peso específico dependerá entonces de la densidad del objeto, para el primer valor de densidad  $704.18 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Cobos & León, 2007), se obtendrá  $704.18 \text{ kgf}/\text{m}^3$ , y para el valor recomendado en el diseño estructural de  $800 \text{ kg}/\text{m}^3$  (NSR-10 R. C., 2010), será de  $800 \text{ kgf}/\text{m}^3$ .

### 2.7.4 Geometría de la sección de GAK

La sección transversal tiene la forma de un tubo cilíndrico, para la determinar el diámetro del culmo y el espesor de real de la pared del culmo se debe seguir los siguientes procedimientos (Cobos & León, 2007).

**Diámetro:** se debe medir en ambos extremos del culmo y en dos direcciones perpendiculares entre sí (Figura 2.23), el valor del diámetro real será el promedio de las cuatro mediciones (NSR-10, 2010).



**Figura 2.24.** Diámetros de secciones transversales (Cobos & León, 2007).

**Espesor:** se tomara en cuenta cuatro mediciones para cada sección transversal del culmo de GAK por lo que se contara con ocho mediciones en total (Figura 2.24), de igual manera se medirá en cada extremo del culmo, el espesor real de la sección transversal corresponde al promedio de las ocho mediciones (NSR-10, 2010).



**Figura 2.25.** Espesores de la sección transversal (Cobos & León, 2007).

## 2.8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA GAK

Las propiedades mecánicas refieren a la capacidad de cada material en estado sólido a resistir acciones de cargas o fuerzas, las principales propiedades son elasticidad, plasticidad, dureza, fragilidad, fatiga, resiliencia, tenacidad, maleabilidad y ductilidad (Vélez, 2013).

La lectura de las propiedades mecánicas de los materiales, se realiza con la interpretación de la rotura de los materiales a los diferentes tipos de esfuerzos y las deformaciones que se generan. En esta sección revisaremos los diferentes tipos de esfuerzos que actúan sobre los elementos estructurales de GAK, así como los valores de ruptura alcanzados en los ensayos (Vélez, 2013).

**El esfuerzo:** se define como la intensidad de las fuerzas componentes internas distribuidas que resisten un cambio en la forma de un cuerpo. El esfuerzo se define en

términos de fuerza por unidad de área en el sistema internacional la unidad es el pascal (Pa) (Wikipedia.org, 2014).

Existen tres clases básicas de esfuerzos: tensivo, compresivo y corte. El esfuerzo se computa sobre la base de las dimensiones del corte transversal de una pieza antes de la aplicación de la carga, que usualmente se llaman dimensiones originales (Vélez, 2013).

**Tracción:** es el esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y lo estiran. Un cuerpo sometido a tracción sufre deformaciones positivas hasta su ruptura, el valor promedio de ruptura a tensión alcanzado en los ensayos de laboratorio de resistencia de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército fue de 72,80 MPa (Cobos & León, 2007).

**Compresión paralela a la fibra:** es el máximo esfuerzo alcanzado por un material al someterse a fuerzas de compresión, con un material quebradizo la falla se produce por ruptura, en este caso el valor de ruptura es definido a diferencia de la de un material dúctil el cual es arbitrario, el valor promedio de ruptura a compresión alcanzado en los ensayos de laboratorio de resistencia de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército fue de 48,34 MPa (Cobos & León, 2007).

**Corte paralelo a la fibra:** es el esfuerzo interno resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un elemento sólido, la distribución de esfuerzos cortantes sobre una sección se sabe que es mayor en el centro y se hace nula en los extremos, el valor promedio máximo de ruptura al corte alcanzado en los ensayos de laboratorio de resistencia de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército fue de 5,46 MPa (Cobos & León, 2007).

**Flexión:** este esfuerzo genera momentos internos, las fibras superiores e inferiores actúan de forma diferente, la fibra superior al eje neutro estará sometido a esfuerzos normales de compresión, y la fibra inferior estará sometido a esfuerzos normales de tensión, el valor promedio alcanzado en los ensayos de laboratorio de resistencia de

materiales de la Escuela Politécnica del Ejército fue de 34,98 MPa (Cobos & León, 2007).

**Deformación:** en términos generales se define como el cambio de forma de un cuerpo, el cual se debe a la aplicación de una fuerza, al cambio térmico, al cambio de humedad entre otras causas. En conjunción con el esfuerzo directo, la deformación se supone como un cambio lineal y se mide en unidades de longitud (Vélez, 2013).

**Deformación unitaria:** Específicamente cuando la deformación se define como el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo, el cual va acompañado por un cambio de esfuerzo, se denomina deformación unitaria debida a un esfuerzo (Figura 2.25). Es una razón o número no dimensional, por lo tanto será la misma sin importar las unidades expresadas (Vélez, 2013), su cálculo se puede realizar mediante la siguiente expresión:

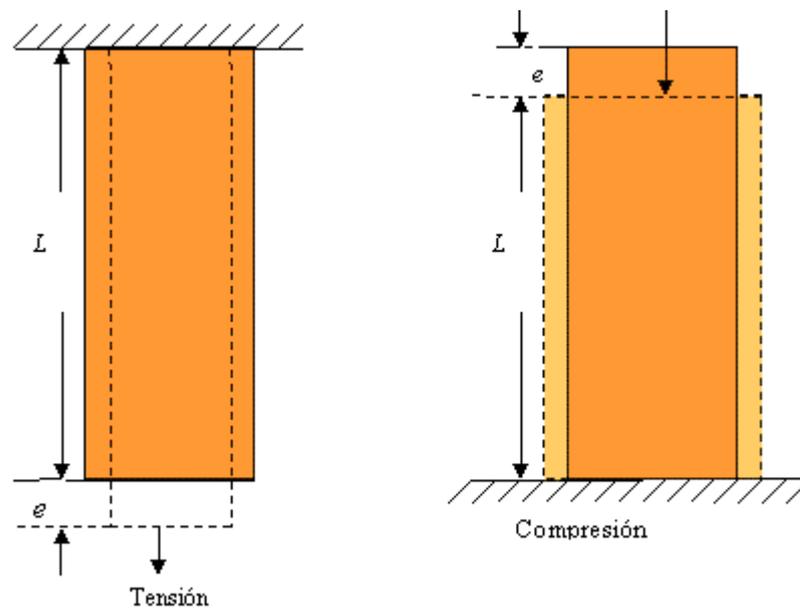
$$\varepsilon = \frac{e}{L} \quad (1)$$

Donde:

$\varepsilon$ , es la deformación unitaria

$e$ , es la deformación

$L$ , longitud del elemento



**Figura 2.26.** Deformación axial genera por esfuerzo de tensión y compresión (Vélez, 2013).

**Módulo de elasticidad longitudinal:** es un parámetro de los materiales elásticos en el sentido o dirección en el que se aplica la fuerza que produce la deformación, es una constante independiente del esfuerzo sin exceder un valor máximo denominado límite elástico (Wikipedia.org, 2014).

Tanto el módulo de elasticidad también conocido como módulo de Young como el límite elástico varían para los diversos materiales, ambas son constantes elásticas, pueden establecerse mediante el ensayo de tracción del material (Wikipedia.org, 2014), mientras el esfuerzo no llegue al límite elástico el módulo de Young se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Donde:

E, es el módulo de elasticidad lineal

$\sigma$ , es el esfuerzo ejercido en el área de sección transversal

$\varepsilon$ , es la deformación unitaria

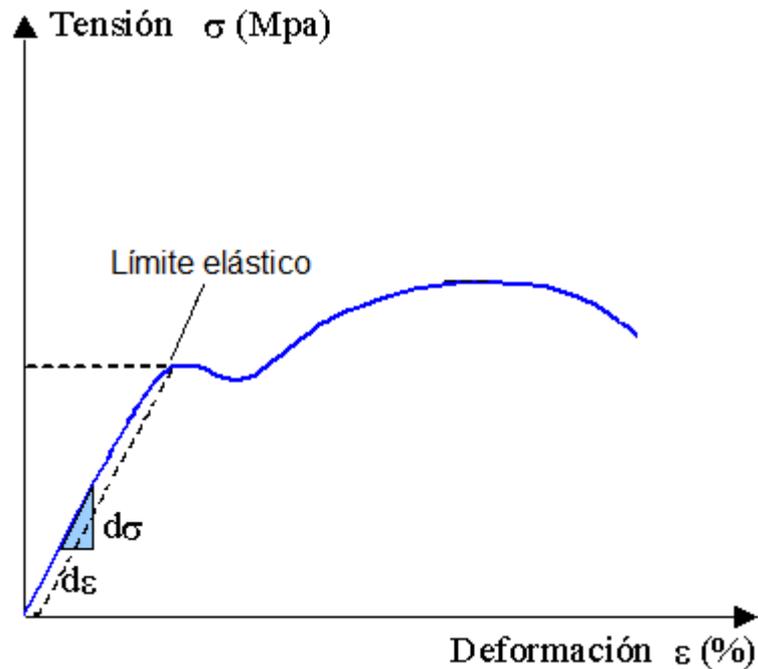


Figura 2.27. Grafico esfuerzo-deformación, limite elástico (Wikipedia.org, 2014).

## 2.9 ESFUERZOS ADMISIBLES PARA DISEÑO CON GAK.

Por ser un material ortotrópico para efectos de diseño y cálculo de secciones con culmos de GAK, que hayan sido cosechados y conservados de la forma que se expuso en los incisos anteriores, se emplearan los siguientes valores de esfuerzos admisibles respectivamente (NSR-10, 2010).

**Tabla 1**

Esfuerzos admisibles  $F_i$  (MPa), CH=12% (NSR-10, 2010).

$F_b$ Flexión	$F_t$ Tracción	$F_c$ Compresión	$F_{p^*}$ Compresión $\perp$	$F_v$ Corte
15	18	14	1.4	1.2

|| = compresión paralela al eje longitudinal.

$\perp$  = compresión perpendicular al eje longitudinal.

\*La resistencia a la compresión perpendicular está calculada para entrenudos rellenos con mortero de cemento.

Los valores máximos de ruptura en laboratorio han sido castigados por coeficientes de minoración con el fin de obtener estos esfuerzos admisibles, los mismos se utilizarán a criterio del diseñador.

## 2.10 MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA EL DISEÑO CON GAK.

El módulo sugerido por el INEN de 17260 MPa es discontinuado e impreciso ya que utiliza diversos valores dependiendo del esfuerzo al que se somete el culmo, se utilizan diversos módulos de elasticidad en relación al tipo de elemento que se analiza, así como el trabajo conjunto de los culmos en secciones compuestas (NSR-10, 2010).

**Tabla 2**

Módulos de elasticidad  $E_i$  (MPa), CH=12% (NSR-10, 2010).

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo $E_{min}$
9.500	7.500	4.000

El módulo promedio ( $E_{0.5}$ ), establece un valor medio para todos los culmos de GAK existentes, es decir la mitad de los culmos tendrán un módulo de elasticidad superior y la otra mitad tendrá un valor inferior al expuesto en la Tabla 2. Se utiliza como el módulo de elasticidad del material (GAK) para el análisis de elementos estructurales (NSR-10, 2010).

El módulo percentil 5 ( $E_{0.05}$ ), establece un valor al que solo el 5% de culmos de GAK trabajan por debajo, es decir el 95% de culmos trabajando conjuntamente cumplirán con este valor. Se debe utilizar para el cálculo de las deflexiones cuando las condiciones de servicio sean críticas o requieran un nivel de seguridad superior al promedio (NSR-10, 2010).

El módulo mínimo ( $E_{\min}$ ), establece un valor de mínimum minimorum al cual ningún culmo de GAK será inferior. Se debe utilizar al momento de calcular los coeficientes de estabilidad de vigas ( $C_L$ ) y de columnas ( $C_P$ ), elementos principales de la estructura (NSR-10, 2010).

## 2.11 BASES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL CON GAK.

El sistema estructural se ajustara los conceptos de muros de carga o pórticos, así mismo las bases del diseño sismorresistente se aplicaran de la misma forma que a una estructura regular (NSR-10, 2010).

Las uniones de la estructura de GAK se consideraran articuladas y no se existirá transmisión de momentos entre los elementos que conformen la unión, con la excepción que los elementos sean continuos en tal caso solo habrá transmisión al elemento continuo (NSR-10, 2010).

Todos los elementos se consideraran homogéneos y lineales, deberán ser diseñados, construidos y unidos con el fin de soportar las combinaciones más extremas de las cargas de servicio asignadas en base al método de Esfuerzos admisibles en el cual afectamos la resistencia del material de diseño (NSR-10, 2010).

$$D+ F \quad (3)$$

$$D+ H + F + L + T \quad (4)$$

$$D+ H+ F + (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (5)$$

$$D+ H+ F + 0.75 (L + T) + 0.75 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (6)$$

$$D+ H + F + W \quad (7)$$

$$D+ H + F + 0.7E \quad (8)$$

$$D+ H+ F + 0.75W+ 0.75L + 0.75 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (9)$$

$$D+ H + F + 0.75 (0.7E) + 0.75L + 0.75 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (10)$$

$$0.6D+W+ H \quad (11)$$

$$0.6D + 0.7E + H \quad (12)$$

Donde:

D, carga muerta

F, cargas debidas al peso y presión de fluidos con densidades bien definidas

H, cargas debidas al empuje lateral del suelo, de agua freática

L, cargas vivas debidas al uso y ocupación de la edificación

T, fuerzas y efectos causados por efectos acumulados de variación de temperatura

Lr, carga viva sobre la cubierta

G, carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento

Le, carga de empozamiento de agua

W, carga de Viento

E, fuerzas sísmicas reducidas de diseño

Deben considerarse los efectos más desfavorables de viento y de sismo (NSR-10, 2010).

## 2.12 DISEÑO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN.

Se utilizaran los mismos procedimientos básicos usados en vigas de otros materiales estructurales, la guadúa presenta una relación entre el módulo de rotura a flexión y el módulo de elasticidad a flexión **MOR/MOE** muy alta, calificándola como un material muy flexible, se deberá prestar especial atención a las deflexiones admisibles pero sin descuidar la resistencia nominal a la flexión, corte y aplastamiento (NSR-10, 2010).

La fórmula para calcular el área neta de la sección transversal de un solo culmo de GAK será:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - (D_e - 2t)^2) \quad (13)$$

Donde:

A, área neta de la sección transversal de guadúa  $mm^2$ .

$D_e$ , diámetro exterior de la guadúa mm.

t, espesor de la pared de guadúa.

### 2.12.1 Deflexiones

Tanto las deflexiones admisibles, deflexiones inmediatas, deflexiones diferidas se examinan con la teoría elástica tradicional, utilizaremos la siguiente tabla.

**Tabla 3**

Fórmulas para el cálculo de deflexiones (NSR-10, 2010).

Condición de carga	Deflexión
Carga Puntual en el centro de la luz	$\Delta = \frac{Pl^3}{48EI} K$
Carga distribuida	$\Delta = \frac{5}{384} \frac{\omega l^4}{EI} K$

K, corresponde a un factor tabulado de deflexión se puede inferir de la siguiente tabla.

**Tabla 4**

Deflexiones admisibles dependiendo del tipo de cielo raso en mm (NSR-10, 2010).

Condición de servicio	Cargas vivas (l/k)	Viento o Granizo (l/k)	Cargas totales (l/k) Nota 2
<b>Elementos de techo / Cubiertas</b>			
<b>Cubiertas inclinadas</b>			
Cielo rasos de pañete o yeso	l/360	l/360	l/240
Otros cielo rasos	l/240	l/240	l/180
Sin cielo raso	l/240	l/240	l/180
Techos planos	Nota 1	Nota 1	l/300
Techos industriales	-	-	l/200
<b>Entrepisos</b>			
Elementos de entepiso	l/360	-	l/240
Entrepisos rígidos	-	-	l/360
<b>Muros exteriores</b>			
Con acabados frágiles	-	l/240	-
Con acabados flexibles	-	l/120	-

### 2.12.2 Efecto del cortante.

Para elementos con relación de  $l/D_e \leq 15$ , se debe realizar una corrección de cortante ( $C_c$ ), como se muestra en la tabla a continuación valores de  $C_c$  para el módulo  $E_{0.5}$ .

**Tabla 5**

Valores de  $C_c$  (NSR-10, 2010).

$l/D_e$	$C_c$
5	0.70
7	0.75
9	0.81
11	0.86
13	0.91
15	0.93

Nota: La guadua angustifolia kunth tiene una relación de  $E/G = 28$

### 2.12.3 Cargas para el cálculo de secciones y deflexiones.

Para obtener la sección transversal requerida, debemos igualar la deflexión calculada con las cargas de la tabla mostrada a continuación con las deflexiones admisibles de la **tabla 4** y determinar el momento de inercia requerido, así también se muestran las combinaciones de carga para el cálculo de las deflexiones inmediatas y diferidas en un plazo de 30 años (NSR-10, 2010).

**Tabla 6**

Cargas distribuidas  $w$  para el cálculo de la sección y deflexiones (NSR-10, 2010).

Condición	CH $\leq$ 19% t $\leq$ 37° C Clima constante	CH $\geq$ 19% t $\leq$ 37° C Clima variable
Calculo de sección (w)	2.0 D + L	2.0 D + L
Deflexiones inmediatas ( $W_{-i}$ )	D + L	D + L
Deflexiones diferidas ( $W_{-f}$ )	2.8 D + 1.3 L	3.8 D + 1.4 L

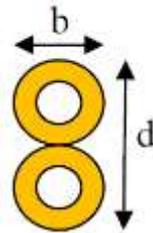
#### 2.12.4 Flexión.

Los esfuerzos de tracción y compresión que se producen por los efectos de la flexión se deben calcular para la sección de máximo momento. Estos esfuerzos no deben exceder de ninguna forma el esfuerzo admisible por flexión  $F_b$  de la **tabla 1** (NSR-10, 2010).

#### 2.12.5 Estabilidad lateral y coeficiente de modificación ( $C_L$ ).

En elementos simples que no son compuestos por varios culmos, el coeficiente de modificación será  $C_L = 1$ . Cuando el elemento sea compuesto, se debe verificar si requiere o no de soporte lateral en la zona comprimida, y el coeficiente de estabilidad lateral ( $C_L$ ), reducirá la capacidad de carga del elemento sometido a flexión por el pandeo y la inestabilidad lateral, este fenómeno sucede cuando la zona de compresión de una viga se comporta como una columna (NSR-10, 2010).

En las vigas compuestas por dos o más canutos de GAK, cuya relación de altura (**d**) y ancho (**b**) sea mayor que 1 es decir ( $d/b > 1$ ), se debe reforzar con soportes laterales para prevenir pandeo lateral o la rotación del elemento (NSR-10, 2010).



**Figura 2.28.** Ejemplo de sección compuesta, alto y ancho (NSR-10, 2010).

### 2.12.6 Estabilidad lateral de vigas compuestas.

Para vigas conformadas por dos o más culmos se debe reducir el esfuerzo admisible a flexión ( $F_b$ ), por el valor de la tabla mostrada a continuación (NSR-10, 2010).

**Tabla 7**

Coefficientes  $C_L$  para diferentes relaciones  $d/b$  (NSR-10, 2010).

$d/b$	$C_L$
1	1.00
2	0.98
3	0.95
4	0.91
5	0.87

Si  $\frac{d}{b} = 2$  no se requerirá soporte lateral

Si  $\frac{d}{b} = 3$  se debe restringir el desplazamiento lateral de los apoyos.

Si  $\frac{d}{b} = 4$  se debe restringir el desplazamiento lateral de los apoyos y del borde en compresión con correas o viguetas.

Si  $\frac{d}{b} = 5$  se debe restringir el desplazamiento lateral de los apoyos y proveer soporte continuo del borde en compresión mediante un entablado.

### 2.12.7 Momento resistente.

El esfuerzo a flexión ( $f_b$ ), en los culmos de guadúa no debe exceder el esfuerzo admisible ( $F'_b$ ), modificado por coeficientes correspondientes en la fórmula:

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F'_b \quad (14)$$

Donde:

$f_b$ , esfuerzo a flexión actuante, en MPa.

M, momento actuante sobre el elemento en N\*mm.

$F'_b$ , esfuerzo admisible modificado, en MPa.

S, módulo de sección  $mm^3$

El módulo de sección (S) para la guadúa se define en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\pi(D_e^4 - [D_e - 2t]^4)}{32D_e} \quad (15)$$

Donde:

S, módulo de sección en  $mm^3$ .

$D_e$ , diámetro promedio exterior en el culmo en mm.

t, espesor promedio de la pared del culmo en mm.

Con el fin de verificar la resistencia a la flexión de las secciones compuestas de dos o más culmos, se calculara el módulo de sección para cada condición particular, se muestran unos ejemplos en la tabla a continuación (NSR-10, 2010).

**Tabla 8**

Módulos de sección para algunas vigas compuestas (NSR-10, 2010).

Sección	S (mm <sup>3</sup> )
	$\frac{\pi(5D_e^4 - 4D_e^2[D_e - 2t]^2 - [D_e - 2t]^4)}{32D_e}$
	$\frac{\pi(35D_e^4 - 4D_e^2[D_e - 2t]^2 - [D_e - 2t]^4)}{96D_e}$

En el caso de emplearse más culmos en la sección compuesta de los expuestos en la **tabla 8**, la inercia del conjunto se calculara como la suma de las inercias individuales de cada uno de los culmos ( $I = \sum I_i$ ). Si se consigue una acción conjunta se los culmos de la sección compuesta la inercia conjunta se podría calcular con el teorema de ejes paralelos (NSR-10, 2010).

$$I = \sum(A_i * d_i) + \sum I_i \quad (16)$$

Donde:

I, inercia de la sección compuesta, en  $mm^4$ .

$A_i$ , área para el i-esimo culmo, en  $mm^2$ .

$d_i$ , distancia entre el centroide del conjunto de culmos y el centroide i-esimo, en  $mm$ .

$I_i$ , la inercia individual de cada culmo de GAK referida a su propio centroide, en  $mm^4$ .

### 2.13 DISEÑO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE GAK.

El esfuerzo cortante máximo que resistirá los elementos de GAK se calculara a una distancia del apoyo igual a la altura del elemento, se la conocerá como (**h**), en el caso de elementos simples la altura será el diámetro exterior del culmo ( $D_e$ ), el máximo esfuerzo cortante debe de ser determinado teniendo en cuenta la distribución no uniforme de los esfuerzos en secciones compuestas, y debe ser inferior al máximo esfuerzo admisible para corte paralelo de las fibras  $F'_V$ , establecido en la **tabla 1** (NSR-10, 2010).

El esfuerzo cortante también como esfuerzo paralelo a las fibras, ( $f'_V$ ), por ningún motivo excederán al esfuerzo admisible  $F'_V$  en la tabla 1, con modificaciones propias del caso dependiendo de las necesidades del diseño (NSR-10, 2010).

$$f_V = \frac{2V}{3A} \left( \frac{3D_e^2 - 4D_e t + 4t^2}{D_e^2 - 2D_e t + 2t^2} \right) \leq F'_V \quad (17)$$

Donde:

$f_V$ , esfuerzo cortante paralelo a las fibras, en MPa.

A, área de sección transversal del elemento de GAK, en  $mm^2$ .

$D_e$ , diámetro externo de la sección de GAK, en mm.

t, espesor promedio de la sección de GAK, en mm.

$F'_V$ , esfuerzo admisible al corte paralelo de las fibras, en MPa.

v, fuerza cortante en la sección considera, en N.

#### 2.13.1 Elementos conectores de las secciones compuestas.

Al momento de crear una viga compuesta de GAK, se debe añadir conectores transversales de acero, que garanticen el trabajo conjunto de los culmos, el máximo espaciamiento entre conectores no puede exceder el mínimo valor de 3 veces el alto

de la viga compuesta es decir **(3h)**, a un cuarto de la luz **(1/4)** o el resultado de la siguiente formula (NSR-10, 2010).

$$j = \frac{7 * l}{V} \quad (18)$$

Donde:

j, espaciamiento entre conectores de vigas compuestas, en mm

l, luz de viga, en mm

V, máximo cortante en la viga, en kN.

#### 2.14 DISEÑO POR APLASTAMIENTO EN ELEMENTOS DE GAK.

La compresión perpendicular a la fibra o aplastamiento ( $f_p$ ), se deben verificar en los apoyos y en lugares donde apliquen cargas concentradas, el esfuerzo de aplastamiento no debe exceder el admisible de compresión perpendicular a la fibra modificado por coeficientes según el lugar y caso específico (NSR-10, 2010).

El esfuerzo a compresión perpendicular de la fibra se calcula con la expresión:

$$f_p = \frac{3RD_e}{2t^2l} \leq F'_p \quad (19)$$

Donde:

$F'_p$ , esfuerzo admisible de compresión paralela a la fibra, en MPa.

$f_p$ , esfuerzo actuante en compresión perpendicular a la fibra, en MPa.

$D_e$ , diámetro externo promedio de la sección de GAK, en mm.

t, espesor del culmo de GAK, en mm.

l, longitud de apoyo, en mm.

R, fuerza aplicada en sentido perpendicular a las fibras, en N.

## 2.16 DISEÑO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A FUERZA AXIAL.

### 2.16.1 Elementos solicitados a tracción axial.

También se lo conoce como tensión actual ( $f_t$ ) para cualquier sección de GAK, el mismo que no debe exceder el esfuerzo a tensión axial admisible ( $F'_t$ ) modificado por los propios coeficientes de cada caso específico (NSR-10, 2010).

$$f_t = \frac{T}{A_n} \leq F'_t \quad (20)$$

Donde:

$f_t$ , esfuerzo de tensión actuante, en MPa.

T, fuerza de tensión axial aplicada, en N.

$F'_t$ , esfuerzo de tensión admisible, en MPa.

$A_n$ , área neta del elemento, en  $mm^2$ .

### 2.16.2 Elementos solicitados a compresión axial.

Establecemos en primer lugar la longitud efectiva de una columna equivalente con articulaciones en los extremos, la misma que se calculara con la siguiente expresión (NSR-10, 2010).

$$l_e = l_u k \quad (21)$$

Donde:

$l_e$ , longitud efectiva del elemento, en mm.

$l_u$ , longitud no soportada lateralmente del elemento, en mm.

k, coeficiente de longitud efectiva, según las restricciones en los apoyos (tabla 9).

**Tabla 9**

Coefficientes de longitud efectiva (NSR-10, 2010).

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

### 2.16.2.1 Revisión de esbeltez.

La esbeltez es una condición que se debe vigilar en el caso de las columnas, en este caso los culmos de GAK constituyen las columnas simples o compuestas por varios elementos, para verificar la esbeltez utilizamos la siguiente expresión (NSR-10, 2010).

$$\lambda = \frac{l_e}{r} \quad (22)$$

Donde:

$\lambda$ , relación esbeltez del elemento.

$l_e$ , longitud efectiva del elemento, en mm.

$r$ , radio de giro de la sección, en mm.

El radio de giro de la sección de una columna simple es decir formada por un solo culmo de GAK, se calcula con la siguiente formula:

$$r = \frac{\sqrt{(D_e^2 + (D_e - 2t)^2)}}{4} \quad (23)$$

Donde:

$D_e$ , diámetro externo promedio del culmo de GAK, en mm.

$t$ , espesor promedio de la sección de GAK, en mm.

$r$ , radio de giro de la sección.

En elementos compuestos por varios elementos de GAK, el radio de giro se calcula con la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (24)$$

Donde:

$I$ , inercia de la sección compuesta de GAK, en  $mm^4$ .

$A$ , área promedio de la sección transversal, en  $mm^2$ .

$r$ , radio de giro en la sección.

Según la relación de esbeltez las columnas de GAK, se clasifican en cortas, intermedias y largas, se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 10**

Clasificación de columnas por la esbeltez (NSR-10, 2010).

Columna	Esbeltez
Corta	$\lambda < 30$
Intermedia	$30 < \lambda < C_k$
Larga	$C_k < \lambda < 150$

**Por ningún motivo se admiten columnas con esbeltez mayor a 150**

El coeficiente  $C_k$ , es límite entre las columnas intermedias y las columnas largas y define por la siguiente expresión:

$$C_k = 2.565 * \sqrt{\frac{E_{0.05}}{F'c}} \quad (25)$$

Donde:

$F'_c$ , esfuerzo admisible en compresión paralela a las fibras, en MPa.

$E_{0.05}$ , módulo de elasticidad percentil 5, en Mpa.

$C_k$ , límite entre columnas intermedia y columnas largas.

### 2.16.2.2 Esfuerzos máximos en función al tipo de columna.

**En columnas cortas ( $\lambda < 30$ )**, el esfuerzo máximo de compresión actuante ( $f_c$ ), sobre cualquier columna de GAK corta, se define en la siguiente expresión, sin sobrepasar el esfuerzo a compresión admisible (NSR-10, 2010).

$$f_c = \frac{N}{A_n} \leq F'_c \quad (26)$$

Donde:

$f_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra actuante, en MPa.

N, fuerza de compresión paralela a la fibra actuante, en N.

$A_n$ , área neta de la sección transversal, en  $mm^2$ .

$F'_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra admisible, en MPa.

**En columnas intermedias ( $30 < \lambda < C_k$ )**, el esfuerzo máximo de compresión actuante ( $f_c$ ), sobre cualquier columna de GAK intermedia, se define en la siguiente expresión, sin sobrepasar el esfuerzo a compresión admisible (NSR-10, 2010).

$$f_c = \frac{N}{A_n * (1 - \frac{2}{5}[\frac{\lambda}{C_k}])} \leq F'_c \quad (27)$$

Donde:

$f_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra actuante, en MPa.

N, fuerza de compresión paralela a la fibra actuante, en N.

$A_n$ , área neta de la sección transversal, en  $mm^2$ .

$F'_c$ , esfuerzo de compresión a la fibra admisible, en MPa.

$\lambda$ , relación esbeltez del elemento.

$C_k$ , límite entre columnas intermedia y columnas largas.

**En columnas largas ( $C_k < \lambda < 150$ ), el esfuerzo máximo de compresión actuante ( $f_c$ ), sobre cualquier de columna de GAK largas, se define en la siguiente expresión, sin sobrepasar el esfuerzo a compresión admisible (NSR-10, 2010).**

$$f_c = 3.3 * \frac{E_{0.05}}{\lambda^2} \leq F'_c \quad (28)$$

Donde:

$f_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra actuante, en MPa.

$F'_c$ , esfuerzo de compresión a la fibra admisible, en MPa.

$\lambda$ , relación esbeltez del elemento paralelo.

$E_{0.05}$ , módulo de elasticidad del percentil 5, en MPa.

## **2.17 DISEÑO DE ELEMENTOS SOLICITADOS POR FLEXIÓN Y CARGA AXIAL.**

### **2.17.1 Elementos solicitados a flexión con tracción axial.**

Los elementos de GAK sometidos simultáneamente a fuerzas de tensión y flexión para su diseño deberán cumplir la siguiente ecuación (NSR-10, 2010).

$$\frac{f_t}{F'_t} + \frac{f_b}{F'_b} \leq 1.0 \quad (29)$$

Donde:

$f_t$ , esfuerzo de tracción actuante, en MPa.

$F'_t$ , esfuerzo de tracción admisible, en MPa.

$f_b$ , esfuerzo de flexión actuante, en MPa.

$F'_b$ , esfuerzo de flexión admisible, en MPa.

### 2.17.2 Elementos solicitados a flexo-compresión.

Los elementos de GAK sometidos simultáneamente a fuerzas de compresión y flexión para su diseño deberán cumplir la siguiente ecuación (NSR-10, 2010).

$$\frac{f_c}{F'_c} + \frac{k_m f_b}{F'_b} \leq 1.0 \quad (30)$$

Donde:

$f_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra actuante, en MPa.

$F'_c$ , esfuerzo de compresión paralela a la fibra admisible, en MPa.

$f_b$ , esfuerzo de flexión actuante, en MPa.

$F'_b$ , esfuerzo de flexión admisible, en MPa.

$k_m$ , coeficiente de magnificación de momentos que se detalla a continuación.

$$k_m = \frac{1}{1 - 1.5 (N_a / N_{cr})} \quad (31)$$

Donde:

$N_a$ , carga de compresión actuante, en N.

$N_{cr}$ , carga crítica de Euler, calculada con la siguiente expresión.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_{0.05} I}{l_e^2} \quad (32)$$

Donde:

$E_{0.05}$ , módulo de elasticidad del percentil 5, en MPa.

$I$ , inercia de la sección compuesta de GAK, en  $mm^4$ .

$l_e$ , longitud efectiva del elemento, en mm.

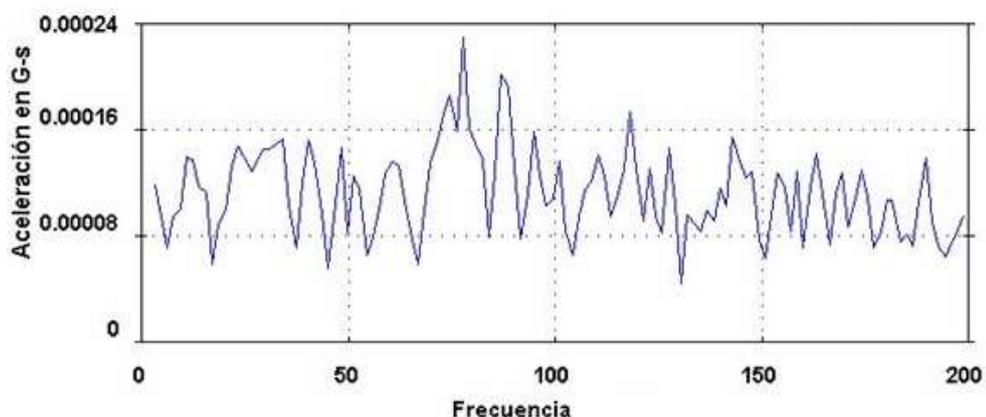
## CAPÍTULO III: TRANSFORMADA DE FOURIER EN ESPECTROSCOPIA.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Las transformadas de Fourier se utilizan como herramientas de cálculo para el **Análisis espectral**, el cual es adecuado para sacar a luz componentes periódicas de un espectro. Consiste en expresar el proceso como una suma de sucesiones periódicas, concretamente trigonométricas permitiendo centrar la atención en las frecuencias que más interesan (Medín, 2006).

En el análisis espectral el objetivo es determinar el contenido de frecuencia, es decir, las frecuencias que componen el espectro y sus respectivas magnitudes. Se aplica a series temporales ( $xt$ ) que están en función del tiempo (Medín, 2006).

**El espectro** es básicamente una serie de datos, que puede entenderse como una sucesión de números, las sucesiones de números reales se pueden escribir como combinaciones lineales de senos y cosenos o exponenciales complejas. Los espectros generalmente tienen componentes periódicas, cuyo período coincide con el tiempo de referencia (en el caso de las señales analógicas). Las series de datos también conocidas como señales, se pueden clasificar en señales analógicas y señales digitales (Wikipedia.org, 2012).





Donde:

$a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  son coeficientes de Fourier en función del período de oscilación  $T$ .

**El período de oscilación (T)** es el mínimo lapso que separa dos instantes en los que el sistema se encuentra exactamente en el mismo estado, por ejemplo en una onda el período sería el tiempo transcurrido entre dos crestas o valles sucesivos, es el inverso a la frecuencia ( $f$ ) (Medín, 2006).

$$T = \frac{1}{\text{frecuencia}} = \frac{2\pi}{\text{frecuencia angular}} \quad (34)$$

Toda función con período  $T$  puede ser expresada con una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo período  $T$ .

**La frecuencia (f)** es el número de repeticiones que se producen en cualquier suceso periódico en una unidad de tiempo. Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabiliza posteriormente el número de ocurrencias de éste, teniendo en cuenta un intervalo temporal, estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido (Medín, 2006).

Según el Sistema Internacional (**SI**), la frecuencia se mide en hercios (**Hz**), un hercio es la frecuencia de un suceso o fenómeno repetido una vez por segundo (Medín, 2006):

$$1\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} \quad (35)$$

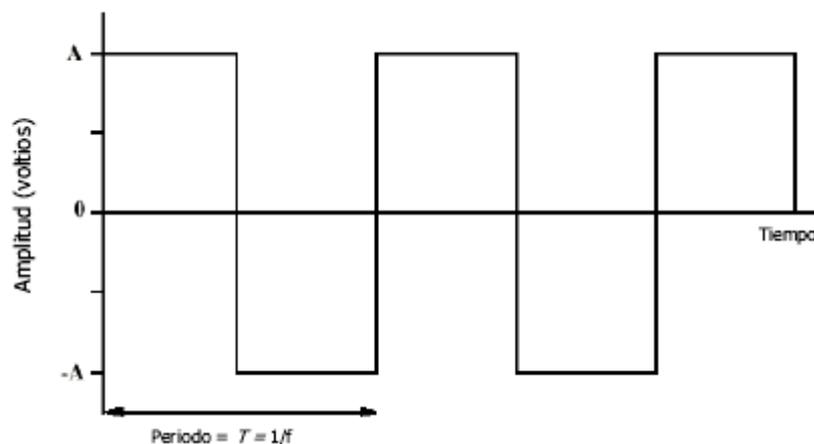
Como se mostró anteriormente la frecuencia se puede calcular midiendo el tiempo entre dos repeticiones es decir el período, convirtiéndose en la inversa del período de oscilación (Medín, 2006):

$$f = \frac{1}{T} \quad (36)$$

## b) Señal digital

Al igual que la señal analógica, la señal digital se produce por algún tipo de fenómeno electromagnético en el que la señal puede transmitir varias magnitudes que representan valores discretos, es decir, la función que define la señal no es continua ya que no se encuentran en un rango determinado (Miyara, 2004).

Las señales digitales requieren de un ordenador para su procesamiento, los programas computacionales utilizan la Transformada discreta de Fourier (*DFT*) y el algoritmo matemático conocido como la Transformada rápida de Fourier (*FFT*) desarrolladas a partir de la transformada de Fourier (*FT*). No se puede aplicar la transformada de Fourier en señales digitales (Miyara, 2004) (Cimbala, 2010).



**Figura 3.3** Señal digital sinodal amplitud vs tiempo.

## 3.2 TRANSFORMADA DE FOURIER: DEFINICIÓN MATEMÁTICA

Se podría definir como el espectro de frecuencias de una función, contiene todas las frecuencias del tiempo en el cual existió la señal, relaciona una función en dominio del tiempo y una función en el dominio de la frecuencia, las frecuencias que compone el espectro se representan como picos en el dominio de la frecuencia (Cimbala, 2010).

Una importante propiedad de la transformada de Fourier es su reversibilidad, siendo capaz de transformaciones de cualquiera de los dominios al otro.

En lugar de usar los senos y cosenos como en las series de Fourier, en la transformada de Fourier se utilizan exponenciales tanto como números complejos, otra diferencia corresponde al uso de integrales en lugar de las sumatorias de funciones utilizadas en las series de Fourier (Cimbala, 2010).

Para una función  $f(t)$ , la transformada de Fourier se define:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (37)$$

La inversa se define como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (38)$$

Donde:

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (39)$$

$$i = \sqrt{-1}$$

$\omega$ , es el rango de las frecuencias angulares asociadas con la señal (el contenido de frecuencia de la señal)

Cuando la señal es  $f(t)$  estamos en el dominio del tiempo, y las variables son reales, cuando se trabaja con la frecuencia angular y la transformada de Fourier  $F(\omega)$ , estamos trabajando en el dominio de la frecuencia y  $F(\omega)$  es compleja (Cimbala, 2010).

### 3.3 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT).

También conocida como transformada digital de Fourier. Transforma una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia

siendo la función original una función en el dominio del tiempo, ésta solo admite una función de entrada discreta, es decir una señal digital y de duración finita, la transformada discreta de Fourier se define como (Cimbala, 2010):

$$F(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t)e^{-i(2\pi k\Delta f)(n\Delta t)} \quad (40)$$

Donde:

$N$ , número total de puntos de datos discretos tomada.

$\Delta t$ , tiempo entre puntos de datos

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

Nótese que la suma ha sustituido a la integración utilizada en la transformada de Fourier, ya que se están examinando datos discretos en lugar de continuos.

El tiempo entre puntos de datos y la frecuencia de muestreo son igual a:

$$\Delta t = \frac{T}{N} \quad (41)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{N}{T} \quad (42)$$

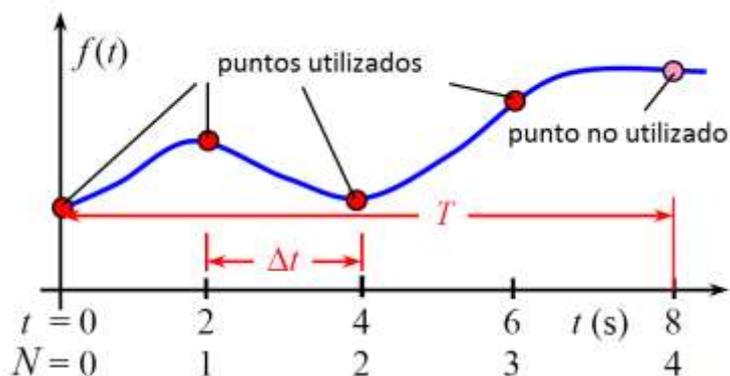
Donde:

$N$ , es el número total de puntos de datos discretos tomada.

$T$ , es el tiempo total de muestreo.

$f_s$ , es la frecuencia de muestreo

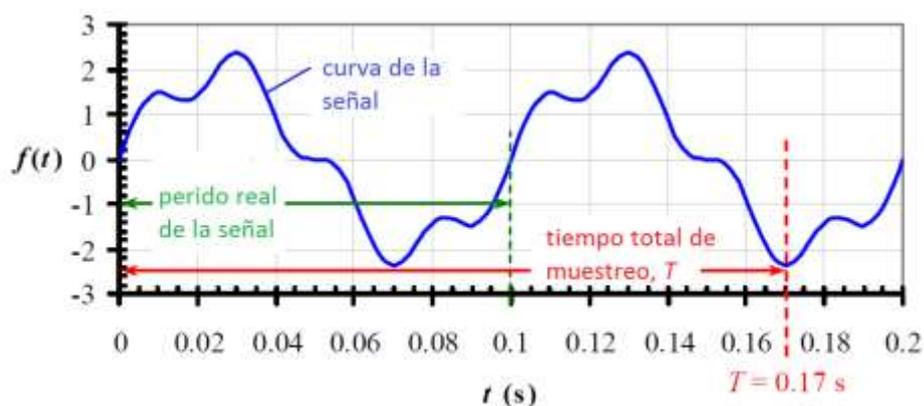
En la **figura 3.4** se ilustra los componentes principales de la DFT en una gráfica  **$f(t)$  vs  $t$** . Se debe tener en cuenta que los números enteros  $n$  y  $k$  en la definición anterior de la DFT deben tener valores de 0 a  $N-1$  y no de 1 a  $N$  (Cimbala, 2010).



**Figura 3.4** Componentes de la DFT: tiempo de muestreo  $T$ , tiempo entre datos  $\Delta t$ , número de muestras  $N$ .

Generalmente no sabemos el período de la señal antes de su procesamiento, y el muestreo puede parar en una fase diferente de la señal a la que se inició el muestreo; por lo tanto el último punto de datos no será idéntico al primer punto de datos (Cimbala, 2010).

En la figura 3.4 se muestra la posibilidad de una señal periódica que se repite cada  $T = 0.1$  segundos, comenzamos el muestreo en  $t = 0$  s, y la interrupción de muestreo a  $T = 0.17$  s (la fase de  $t = T$  difiere de  $t = 0$ ).



**Figura 3.5** Señal de periódica real  $T = 0.1$  s y período d muestreo  $T = 0.17$  s.

A diferencia del análisis de series de Fourier,  $T$  en la transformada discreta de Fourier no es necesariamente igual al período fundamental ( $T$ ) de la señal original.

**Nota:** En la mayoría de las mediciones experimentales reales, el período fundamental  $T$  de la señal es desconocido; el tiempo total de muestreo  $T$  generalmente no guarda relación alguna con nada inherente a la propia señal. En algunos casos la señal examinada por la transformada de Fourier no es ni siquiera una señal puramente periódica, estos valores de discrepancia conducen a algunas imprecisiones cuando se utiliza transformadas de Fourier discretas (Cimbala, 2010).

En el dominio de la frecuencia, las variables relevantes obtenidas son:

$\Delta f$ , es el incremento de frecuencia, llamado también la resolución de frecuencia, el incremento de frecuencia  $\Delta f$  se asemeja a la frecuencia fundamental de una serie de Fourier (Cimbala, 2010).

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (43)$$

$F(k\Delta f)$ , son los valores obtenidos tras la aplicación de la transformada de Fourier discreta, un número complejo para cada frecuencia discreta.

Tener en cuenta, que a diferencia de una serie de Fourier, el incremento de frecuencia  $\Delta f$ , no tiene nada que ver con el contenido de frecuencia o la frecuencia fundamental de la señal original, porque  $\Delta f$  es simplemente  $1/T$ , donde  $T$  es un período de tiempo arbitrario (**tiempo total de muestreo**), como se discutió anteriormente esto conduce a algunos errores inherentes asociados con las transformadas de Fourier (Cimbala, 2010).

### 3.3.1 Criterio de Nyquist

El criterio de Nyquist también es importante en el análisis de DFT, cuando se toman muestras a una frecuencia  $f_s$ , obtenemos información confiable y útil de las frecuencias sólo para un número de frecuencias menores a  $f_s/2$  (Cimbala, 2010).

Hay N valores de salida de la DFT, se expresan de la siguiente forma  $F(k\Delta f)$  para  $k= 0, 1, 2, \dots, N-1$ , igual número N de frecuencias discretas.

Tenemos que:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (43)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{N}{T} \quad (42)$$

Podemos fácilmente calcular a que valor de  $k$  cuando la frecuencia  $k\Delta f$  es igual a  $f_s/2$  así:

$$k\Delta f = \frac{f_s}{2} \quad (44)$$

Despejando:

$$k = \frac{f_s}{2\Delta f} = \frac{N/T}{2*(1/T)} = \frac{N}{2} \quad (45)$$

Por tanto el mayor número de datos de frecuencias confiables conocido como la frecuencia máxima útil  $f_{max}$  también llamada frecuencia doblada se define:

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2} * \Delta f \quad (46)$$

En otras palabras, sólo la mitad de los valores N de salida disponibles de la DFT son útiles, ósea para  $k$  desde 0 a  $N/2$ , igualmente corresponde a las frecuencias de 0 a  $f_s/2$ , la otra mitad de los valores son descartados (Cimbala, 2010).

### 3.4 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A pesar que la técnica de la DFT da una respuesta fugaz de un sistema de datos, la implementación de la misma no se volvió practica hasta la publicación del algoritmo

de Fast Fourier Transform (FFT) (Cooley-Tukey, 1965), el algoritmo permite calcular la DFT y su inversa de forma muy eficiente al eliminar una gran parte de cálculos repetitivos a los que está sometida la DFT, además, la FFT generalmente permite una mayor precisión disminuyendo los errores de redondeo (Cimbala, 2010).

La aplicación de la FFT se realiza mediante un programa para computador, desde entonces la FFT ha impulsado una revolución en muchas áreas de la tecnología, incluyendo el área de pruebas de vibraciones. Todas las reglas y detalles sobre DFT descritos anteriormente se aplican a FFT también (Cimbala, 2010).

Para muchos FFT (tales como el análisis de Fourier de Microsoft Excel), el algoritmo de ordenador restringe  $N$  a una potencia de 2, tales como 64, 128, 256, y así sucesivamente. Sin embargo, algunos algoritmos FFT no tienen esta restricción, por ejemplo, la FFT utilizados en LabVIEW y MATLAB no tienen esta restricción (Cimbala, 2010).

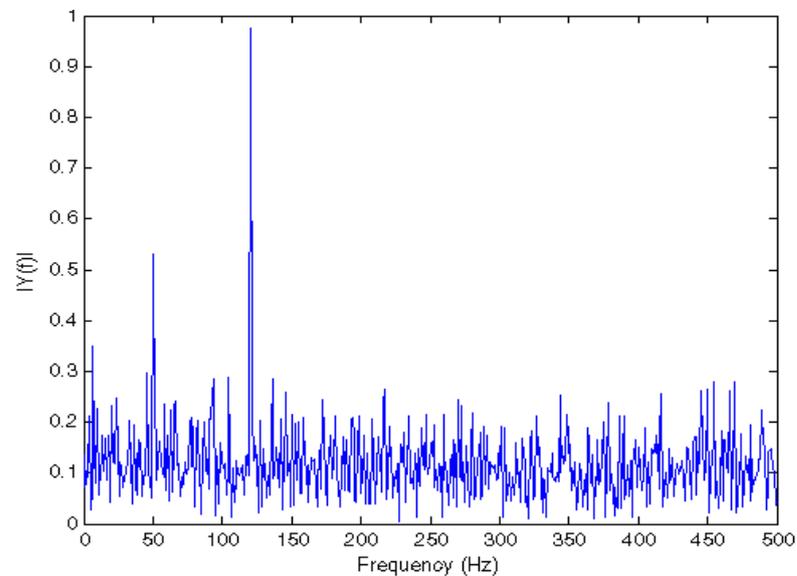
### 3.4.1 FFT en el ordenador.

Gracias a las herramientas computacionales la comprensión del algoritmo de la FFT pasa a segundo plano al ser un tema de estudio de la computación científica, nuestro objetivo se convierte en configurar los parámetros de la función FFT y la correcta interpretación de los resultados que arroje (Cimbala, 2010).

Los resultados de una subrutina FFT es una serie de números complejos, uno para cada uno de los datos muestreados de forma discreta, que representa a cada frecuencia discreta, sólo la mitad de los cuales son útiles debido a el criterio de Nyquist, la magnitud o amplitud del número complejo es en realidad utilizado para comparar la importancia relativa de las diversas frecuencias, la magnitud del número complejo  $|F|$  se llama módulo (Cimbala, 2010).

La grafica de la magnitud  $|F|$  que arroja la FFT, frente a la frecuencia  $f$  se llama **espectro de frecuencia**. Algunos autores llaman a esto el espectro de amplitud ya que

las dimensiones y las unidades del eje vertical son las mismas que los de la amplitud de la señal original (Cimbala, 2010).



**Figura 3.6** Espectro de frecuencia o espectro de amplitud.

### 3.4.2 Cálculo de la FFT y trazado del espectro de frecuencias en Microsoft Excel.

En Excel, una FFT se calcula y se representa mediante el siguiente procedimiento (Cimbala, 2010):

- Crear y llenar una columna que representa  $t$  (tiempo para cada punto de datos discretos), a partir de  $t = 0$  a  $T$  (tiempo de muestreo), con  $\Delta t = 1/f_s$ .
- Llenar una columna que representa la señal discreta  $f(t)$  (usualmente obtenida experimentalmente por muestreo digital de datos), en cada fila un dato correspondiente para cada uno de los datos de la columna tiempo (desde  $t=0$  hasta  $T$ ).
- Para la versión Microsoft Excel 2013, se debe activar la herramienta “Análisis de datos” para ello, hacemos clic en el menú “ARCHIVO”, luego seleccionamos “Opciones”, se despliega un menú en el lado izquierdo de la pantalla y hacemos clic

en “Complementos”, se genera un botón “Ir...” en el lado derecho de la pantalla, hacemos clic en él y se abre una pequeña ventana llamada “Complementos”, marcamos “Herramientas para análisis” y luego en Aceptar.

- Una vez activada la herramienta en Microsoft Excel 2013, se hace clic en el menú “DATOS”. Luego en la herramienta “Análisis de Datos Análisis”. En el submenú desplegado seleccionamos “Análisis de Fourier”, y hacemos clic en Aceptar.
- En la ventana “Análisis de Fourier”, para el rango de entrada, seleccionamos la señal que se analiza es decir la columna de datos discretos  $f(t)$ . Para el rango de salida, seleccione la celda superior de una columna vacía y hacemos clic en Aceptar. Los datos de Salida de la FFT será una columna de números complejos.
- Puesto que la salida de la FFT es una columna de números complejos, debemos convertir cada valor en una amplitud utilizando la función **IM.ABS** de Excel calculamos las amplitudes en otra columna separada.
- Se debe realizar ciertas correcciones en los valores de esta columna para obtener los valores correctos de las amplitudes, esto se debe realizar en otra columna de la siguiente manera:
  - Dividimos cada dato de amplitud para el valor  $(N/2)$ , de manera que la amplitud corregida corresponde directamente a la amplitud de la señal inicial.
  - Además, dividimos el primer valor de la columna (en  $f=0$  Hz) para 2, así esta amplitud corresponde adecuadamente con el resto de valores de la columna (valor medio).
- Debemos tener en cuenta que sólo la mitad de estas amplitudes son útiles para realizar grafico del espectro de frecuencias debido al criterio de Nyquist. La segunda mitad de la columna (todo más allá  $k = N/2$ ) puede ser suprimido o ignorado.

- Se debe crear y llenar una columna que represente las frecuencias discretas, a partir de  $f=0$ , el mismo que se irá incrementando en  $\Delta f$  hasta la frecuencia útil máxima, es decir  $f_{doblada} = F_s/2$ .
- Finalmente, insertamos el grafico **espectro de frecuencias**, tomamos los valores de la columna de amplitud modificada como los componentes verticales del eje Y, los valores de la columna de frecuencia discreta serán los del eje horizontal X los mismos que deben variar de 0 a  $f_{doblada}$ .

## **CAPÍTULO IV: ENSAYOS EXPERIMENTALES.**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Para lograr alcanzar los objetivos y las metas planteadas en este Proyecto de Tesis, se procede a la aplicación (*in situ*) de ensayos no destructivos de naturaleza estática y dinámica en el puente peatonal de la hacienda “Las Delicias”, con el fin de generar un modelo analítico para asemejar el comportamiento de la *Guadúa angustifolia Kunth* (GAK) luego de haber estado en funcionamiento por 10 años, se pondrá énfasis en el funcionamiento de la cercha y el funcionamiento de las juntas en las cuales se espera irregularidades.

### **4.2 ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICA**

#### **4.2.1 Alcance**

Este ensayo de carga puntual permite la medición de la deflexión controlada, que no deberá ser superior a  $L/500$  según AASHTO (1997), en los elementos de la estructura. Además, una vez retirada la carga este ensayo permite cuantificar las deformaciones permanentes de la estructura producidas por la reubicación de los elementos en las juntas.

#### **4.2.2 Objetivo**

Determinar la deflexión en los elementos de la estructura sin sobrepasar una  $L/500$  y cuantificar las deformaciones permanentes luego de retirar la carga.

#### **4.2.3 Materiales y equipos**

Para la medición de la geometría real del puente se utilizó una cinta métrica (20 m) y un flexómetro (5 m) como se ve en la figura 4.1.



**Figura 4.1** Cinta métrica y flexómetro.

Para la ejecución de este ensayo se empleó arena de río mostrada en la figura 4.2 como carga y los saquillos de yute mostrados en la figura 4.3 para confinarla. Como se observa en la figura 4.4 se utilizó una balanza colgante tipo reloj con capacidad de hasta 100 kg y una exactitud de  $\pm 0,25$  kg para obtener el peso deseado de la arena.



**Figura 4.2** Arena de río.



**Figura 4.3** Saquillos de yute.



**Figura 4.4** Balanza colgante.

Los equipos utilizados para la medición de la deflexión de los elementos de la estructura fueron:

**Deformímetro:** de marca BAKER, modelo 1502252.1, con lecturas de 0,01 mm, rango máximo de deformación 25.0 mm, graduación de 0-100.



**Figura 4.5** Deformímetro BAKER

**Teodolito:** de marca NIKON, modelo NE-102, con precisión de 10 segundos en mediciones verticales y horizontales, tipo de sistema incremental, medición de ángulos verticales simple, medición de ángulos horizontales doble, aumento del lente 30X, campo visual de  $1^{\circ}20'$ , 2 pantallas LCD de 5 teclas cada una, resistente al agua y polvo.



**Figura 4.6** Teodolito NIKON.

#### **4.2.4 Procedimiento ensayo carga estática.**

##### **Medición de los datos geométricos del puente.**

Se tomaron datos reales de la geometría del puente, se incluyeron la luz del puente, longitud del arco sobre el cual se transita, ancho de la sección inicial, a un cuarto de la luz, a la mitad de la luz, a los  $\frac{3}{4}$  de la luz y al final de la luz del puente.

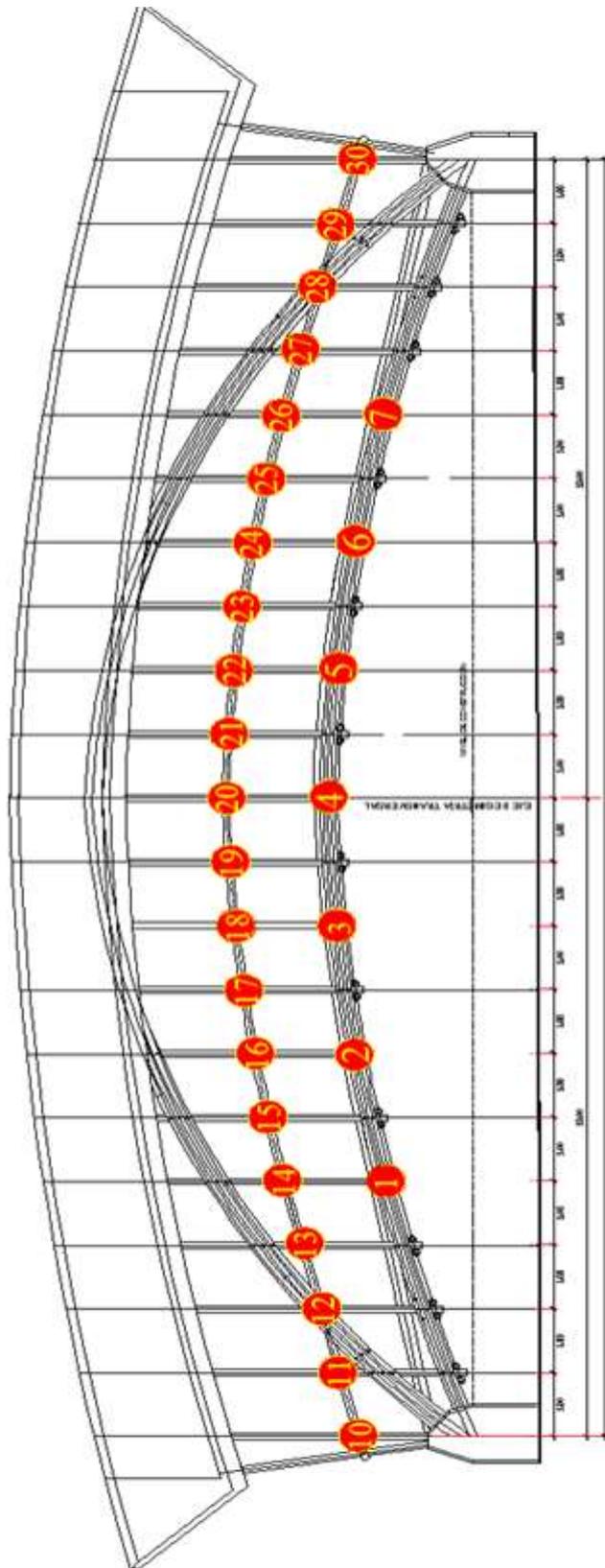
##### **Preparación de cargas aplicables**

Se armaron 14 saquillos con 50 kg de arena cada uno, los mismos que fueron cerrados con cordón de arroz y de nilón. La carga concentrada total fue de 700 kg.

##### **Colocación de deformímetros y plantación de teodolito**

Dos deformímetros se colocaron en juntas que se consideraron de especial interés para definir el comportamiento del puente. Uno de ellos fue colocado a un cuarto de la luz del puente ( $L/4$ ) y el otro a dos metros del primero con dirección al centro del puente.

El teodolito se instaló en una posición estratégica que permitió la visualización completa del puente, se marcó puntos específicos en la estructura con el fin de una fácil localización a través del teodolito. Luego se tomaron las distancias horizontales existentes desde cada uno de los puntos a él teodolito. Los puntos marcados se encuentran detallados en la figura mostrada a continuación.



**Figura 4.7** Esquema de puntos monitoreados con teodolito.

### **Aplicación de carga estática y toma de lecturas.**

Sin aplicar carga alguna se procedió a tomar lectura de los ángulos verticales y horizontales desde el teodolito a cada punto de interés en la estructura detallada en la **figura 4.7** denominamos esta etapa como “sin carga”.

La carga concentrada de 700 kg (equivalente a 14 saquillos de arena) fue aplicada en el área de un metro cuadrado ubicado en la mitad de la luz del puente. Al total de las 14 cargas se le sumó el de 4 personas con un peso promedio de 75 kg en la misma área de un metro cuadrado, aplicando de esta manera un total de 1000 kg de carga concentrada en la mitad de la luz del puente, denominamos esta etapa como “totalmente cargada”.

Una vez aplicada la carga se tomó la lectura de los ángulos verticales y horizontales a cada uno de los puntos en el puente establecidos anteriormente, a través del teodolito.

Finalmente, todas las cargas fueron retiradas de la estructura tras lo cual se tomó lectura de los ángulos verticales y horizontales para obtener la deformación permanente de la estructura, denominamos esta etapa como “deformada”.

#### **4.2.5 Cálculos ensayo carga estática.**

Las lecturas de los ángulos horizontales y verticales obtenidas a través del teodolito se encuentran en notación sexagesimal (grados, minutos y segundos) las cuales fueron transformados a notación decimal aplicando la siguiente fórmula:

$$X^{\circ} Y' Z'' = X^{\circ} + Y'(1/60) + Z''(1/3600) \quad (48)$$

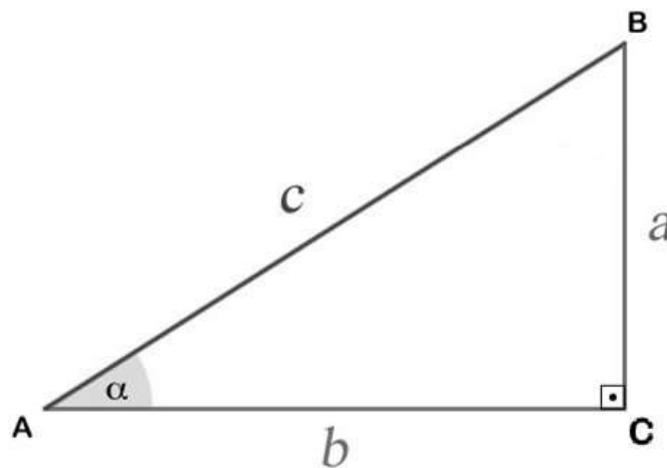
Donde:

$X^{\circ}$  = grados,

$Y'$  = minutos,

$Z''$  = segundos,

Una vez que los datos se expresaron en notación decimal se procedió al cálculo de la distancia vertical existente desde el punto de referencia (es decir, desde la mira del teodolito) hasta cada uno de los puntos en el puente establecidos anteriormente, mediante la aplicación de la fórmula de la razón trigonométrica tangente:



**Figura 4.8** Triángulo Rectángulo (Wikipedia.org, 2014)

$$\tan(\alpha) = \frac{a}{b} \quad (49)$$

Despejando:

$$a = b * \tan(\alpha) \quad (50)$$

Donde:

$\alpha$ , ángulo en notación decimal obtenido a través del teodolito.

$a$ , distancia vertical desde la mira del teodolito hasta el puente.

$b$ , distancia horizontal desde la mira del teodolito hasta el puente.

Finalmente se obtuvo las deflexiones producidas por la carga estática de 700 kg y el peso adicional de 4 personas descrito anteriormente, se restó la distancia vertical desde la mira al teodolito hasta el puente ( $a$ ) de la etapa “sin carga” a la distancia

vertical desde la mira del teodolito hasta el puente de la etapa “cargada 100%”. También, se obtuvo las deformaciones permanentes de la estructura, se restó la distancia vertical desde la mira del teodolito hasta el puente de la etapa “sin carga” a la distancia vertical desde la mira del teodolito hasta el puente de la etapa “deformada”.

## 4.2.6 Resultados ensayo carga estática.

### 4.2.6.1 Lecturas

Se detalla los datos y resultados como los ángulos en notación decimal, así como la distancia vertical (a) de cada etapa a continuación:

**Tabla 11.**

Etapa “sin carga” puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL	ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
1	14,73	89	5	50	89,097	0,903	0,232
2	14,06	87	50	10	87,836	2,164	0,531
3	13,48	86	48	30	86,808	3,192	0,752
4	13,37	86	29	20	86,489	3,511	0,820
5	13,41	86	46	40	86,778	3,222	0,755
6	13,71	87	35	20	87,589	2,411	0,577
7	14,23	89	0	0	89,000	1,000	0,248

**Tabla 12.**

Etapa “sin carga” puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	ANGULO VERTICAL					ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
		GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL			
10	16,69	86	56	30	86,942	3,058	0,892	
11	16,16	86	35	10	86,586	3,414	0,964	
12	15,68	86	0	0	86,000	4,000	1,096	
13	15,18	85	44	20	85,739	4,261	1,131	
14	14,73	85	10	30	85,175	4,825	1,243	
15	14,38	84	39	30	84,658	5,342	1,345	
16	14,06	83	51	20	83,856	6,144	1,514	
17	13,79	83	14	50	83,247	6,753	1,633	
18	13,48	82	46	10	82,769	7,231	1,710	
19	13,45	82	23	50	82,397	7,603	1,795	
20	13,37	82	19	40	82,328	7,672	1,801	
21	13,36	82	28	0	82,467	7,533	1,767	
22	13,41	82	38	50	82,647	7,353	1,730	
23	13,53	82	59	50	82,997	7,003	1,662	
24	13,71	83	27	40	83,461	6,539	1,571	
25	13,93	84	6	40	84,111	5,889	1,437	
26	14,23	85	4	40	85,078	4,922	1,226	
27	14,57	86	5	10	86,086	3,914	0,997	
28	14,97	87	7	10	87,119	2,881	0,753	
29	15,39	87	56	30	87,942	2,058	0,553	
30	15,91	88	45	50	88,764	1,236	0,343	

**Tabla 13.**

Etapa “totalmente cargada” puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	ANGULO VERTICAL					ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
		GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL			
1	14,73	89	6	0	89,100	0,900	0,231	
2	14,06	88	7	50	88,131	1,869	0,459	
3	13,48	86	50	10	86,836	3,164	0,745	
4	13,37	86	30	0	86,500	3,500	0,818	
5	13,41	86	49	20	86,822	3,178	0,745	
6	13,71	87	27	0	87,450	2,550	0,611	
7	14,23	88	59	50	88,997	1,003	0,249	

**Tabla 14.**

Etapa “totalmente cargada” puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	ANGULO VERTICAL					ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
		GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL			
10	16,69	86	53	40	86,894	3,106	0,906	
11	16,16	86	31	20	86,522	3,478	0,982	
12	15,68	85	57	20	85,956	4,044	1,109	
13	15,18	85	46	0	85,767	4,233	1,124	
14	14,73	85	9	20	85,156	4,844	1,248	
15	14,38	84	38	30	84,642	5,358	1,349	
16	14,06	83	51	30	83,858	6,142	1,513	
17	13,79	83	14	40	83,244	6,756	1,634	
18	13,48	82	48	40	82,811	7,189	1,700	
19	13,45	82	27	10	82,453	7,547	1,782	
20	13,37	82	21	40	82,361	7,639	1,793	
21	13,36	82	30	40	82,511	7,489	1,756	
22	13,41	82	40	0	82,667	7,333	1,726	
23	13,53	83	0	50	83,014	6,986	1,658	
24	13,71	83	28	30	83,475	6,525	1,568	
25	13,93	84	6	50	84,114	5,886	1,436	
26	14,23	85	5	0	85,083	4,917	1,224	
27	14,57	86	5	20	86,089	3,911	0,996	
28	14,97	87	7	10	87,119	2,881	0,753	
29	15,39	87	56	40	87,944	2,056	0,552	
30	15,91	88	46	10	88,769	1,231	0,342	

**Tabla 15.**

Etapa “deformada” puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	ANGULO VERTICAL					ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
		GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL			
1	14,73	89	6	0	89,100	0,900	0,231	
2	14,06	87	50	50	87,847	2,153	0,529	
3	13,48	86	48	50	86,814	3,186	0,750	
4	13,37	86	29	50	86,497	3,503	0,818	
5	13,41	86	47	0	86,783	3,217	0,754	
6	13,71	87	27	30	87,458	2,542	0,609	
7	14,23	88	59	30	88,992	1,008	0,250	

**Tabla 16.**

Etapa “deformada” puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	DIST. HORIZONTAL (b) m	ANGULO VERTICAL				ANGULO ( $\alpha$ ) °	DIST. VERTICAL (a) m
		GRADOS °	MINUTOS '	SEGUNDOS "	ANG. DECIMAL		
10	16,69	86	56	0	86,933	3,067	0,894
11	16,16	86	34	55	86,582	3,418	0,965
12	15,68	85	59	0	85,983	4,017	1,101
13	15,18	85	46	10	85,769	4,231	1,123
14	14,73	85	10	10	85,169	4,831	1,245
15	14,38	84	39	40	84,661	5,339	1,344
16	14,06	83	52	0	83,867	6,133	1,511
17	13,79	83	15	10	83,253	6,747	1,631
18	13,48	82	47	10	82,786	7,214	1,706
19	13,45	82	24	50	82,414	7,586	1,791
20	13,37	82	21	10	82,353	7,647	1,795
21	13,36	82	29	20	82,489	7,511	1,762
22	13,41	82	39	10	82,653	7,347	1,729
23	13,53	82	58	50	82,981	7,019	1,666
24	13,71	83	28	30	83,475	6,525	1,568
25	13,93	84	7	30	84,125	5,875	1,433
26	14,23	85	5	30	85,092	4,908	1,222
27	14,57	86	5	40	86,094	3,906	0,995
28	14,97	87	8	40	87,144	2,856	0,747
29	15,39	87	56	40	87,944	2,056	0,552
30	15,91	88	46	20	88,772	1,228	0,341

Luego de haber realizado el procedimiento para determinar la deflexión en los elementos de la estructura sin sobrepasar el límite elástico del material (GAK) y cuantificar las deformaciones permanentes luego de retirar la carga, se obtuvieron los resultados que se detallan a continuación.

#### 4.2.6.2 Deflexiones.

**Tabla 17.**

Deflexiones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "CARGADA 100%" DIST. VERTICAL (m)	DEFLEXIONES (m)	DEFLEXIONES (mm)
1	0.232	0.231	-0.0007	-0.714
2	0.531	0.459	-0.0723	-72.344
3	0.752	0.745	-0.0066	-6.555
4	0.820	0.818	-0.0026	-2.603
5	0.755	0.745	-0.0104	-10.435
6	0.577	0.611	0.0333	33.296
7	0.248	0.249	0.0007	0.690

**Tabla 18.**

Deflexiones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "CARGADA 100%" DIST. VERTICAL (m)	DEFLEXIONES (m)	DEFLEXIONES (mm)
10	0.892	0.906	0.0138	13.795
11	0.964	0.982	0.0181	18.085
12	1.096	1.109	0.0122	12.223
13	1.131	1.124	-0.0074	-7.400
14	1.243	1.248	0.0050	5.035
15	1.345	1.349	0.0042	4.220
16	1.514	1.513	-0.0007	-0.690
17	1.633	1.634	0.0007	0.678
18	1.710	1.700	-0.0100	-9.960
19	1.795	1.782	-0.0133	-13.272
20	1.801	1.793	-0.0079	-7.919
21	1.767	1.756	-0.0105	-10.544
22	1.730	1.726	-0.0046	-4.627
23	1.662	1.658	-0.0040	-3.995
24	1.571	1.568	-0.0034	-3.367
25	1.437	1.436	-0.0007	-0.683
26	1.226	1.224	-0.0014	-1.390
27	0.997	0.996	-0.0007	-0.710
28	0.753	0.753	0.0000	0.000
29	0.553	0.552	-0.0007	-0.747
30	0.343	0.342	-0.0015	-1.543

#### 4.2.6.2 Deformaciones.

**Tabla 19.**

Deformaciones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "DEFORMADA" DIST. VERTICAL (m)	DEFORMACIÓN (m)	DEFORMACIÓN (mm)
1	0.232	0.231	-0.0007	-0.714
2	0.531	0.529	-0.0027	-2.730
3	0.752	0.750	-0.0013	-1.311
4	0.820	0.818	-0.0020	-1.952
5	0.755	0.754	-0.0013	-1.304
6	0.577	0.609	0.0313	31.298
7	0.248	0.250	0.0021	2.070

**Tabla 20.**

Deformaciones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "DEFORMADA" DIST. VERTICAL (m)	DEFORMACIÓN (m)	DEFORMACIÓN (mm)
10	0.892	0.906	0.0138	13.795
11	0.964	0.982	0.0181	18.085
12	1.096	1.109	0.0122	12.223
13	1.131	1.124	-0.0074	-7.400
14	1.243	1.248	0.0050	5.035
15	1.345	1.349	0.0042	4.220
16	1.514	1.513	-0.0007	-0.690
17	1.633	1.634	0.0007	0.678
18	1.710	1.700	-0.0100	-9.960
19	1.795	1.782	-0.0133	-13.272
20	1.801	1.793	-0.0079	-7.919
21	1.767	1.756	-0.0105	-10.544
22	1.730	1.726	-0.0046	-4.627
23	1.662	1.658	-0.0040	-3.995
24	1.571	1.568	-0.0034	-3.367
25	1.437	1.436	-0.0007	-0.683
26	1.226	1.224	-0.0014	-1.390
27	0.997	0.996	-0.0007	-0.710
28	0.753	0.753	0.0000	0.000
29	0.553	0.552	-0.0007	-0.747
30	0.343	0.342	-0.0015	-1.543

### 4.3 ENSAYOS DE CARGA DINÁMICA

#### 4.3.1 Alcance.

Este ensayo de carga dinámica permite la medición de las aceleraciones en los puntos donde se encuentran los acelerómetros, considerando que la carga dinámica (saltos oscilatorios de personas) se aplicara durante un minuto con los acelerómetros en funcionamiento. Además el posterior procesamiento de los datos de las aceleraciones permitirá obtener el espectro de frecuencias así como el período de vibración de la estructura analizada.

#### 4.3.2 Objetivo.

Aplicar cargas dinámicas sobre la estructura durante al menos un minuto y medir las aceleraciones en los elementos de la estructura donde se ubiquen los acelerómetros. Además procesar los datos de las aceleraciones y obtener el espectro de frecuencias y el período de vibración de la estructura analizada.

### 4.3.3 Materiales y Equipos.

Al igual que en el ensayo de carga estática se empleó arena de río mostrada en la figura 4.1 como carga y los saquillos de yute mostrados en la figura 4.2 para confinarla.

Los equipos utilizados para la medición de las aceleraciones de ciertos elementos considerados importantes en la estructura fueron:

**Acelerómetro** de marca LIBELIUM, modelo WaspMote, versión 1.1, con frecuencia desde 900MHz a 14 MHz, microcontrolador ATmega 1281, código abierto para recepción de datos.



**Figura 4.9** Acelerómetro LIBELIUM instalado en una columna del puente.

**Computador** para recepción de datos del acelerómetro: de marca SONY VAIO, modelo SVE-14115FLW, con procesador Intel(R) Core™ i5-2450M @ 2.5 GHz, sistema operativo Windows 7 ultimate de 64 bits, integrado con el software WaspMote-Api Versión 0.33 año 2013.

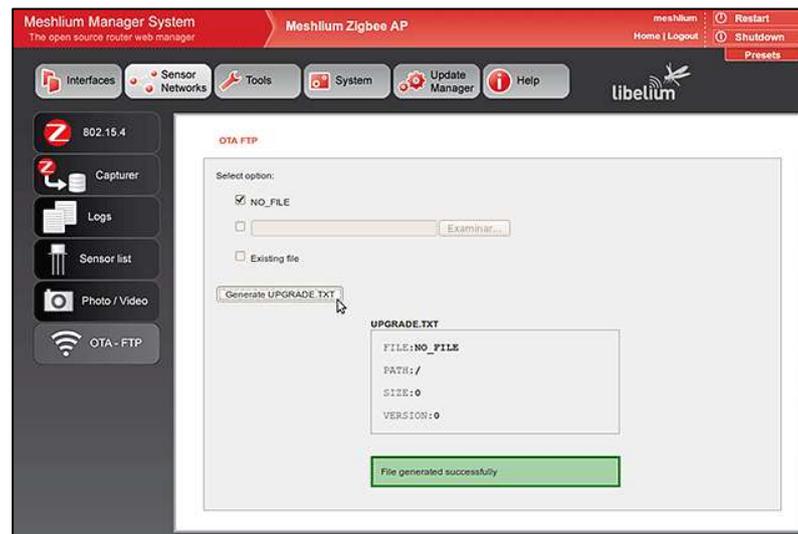


Figura 4.10 Software WaspMote-Api V.0.33

#### 4.3.4 Procedimiento.

##### Preparación de cargas aplicables

Se siguió el mismo procedimiento descrito en el ensayo de carga estática para la preparación de cargas aplicables.

##### Colocación de acelerómetros

Se colocaron 8 acelerómetros (A, B, C, D, E, G, H, I) en juntas consideradas de especial interés, a la altura de un metro por encima del computador para la correcta transmisión de datos entre estos dispositivos. Dos de estos acelerómetros se colocaron en la mitad de la luz del puente ( $L/2$ ) uno en cada cara del puente, tres de ellos se colocaron a una distancia de dos metros entre sí a partir del centro de la luz en cada cara del puente.

Las ubicaciones de los acelerómetros en el puente se encuentran detallados en la figura mostrada a continuación.

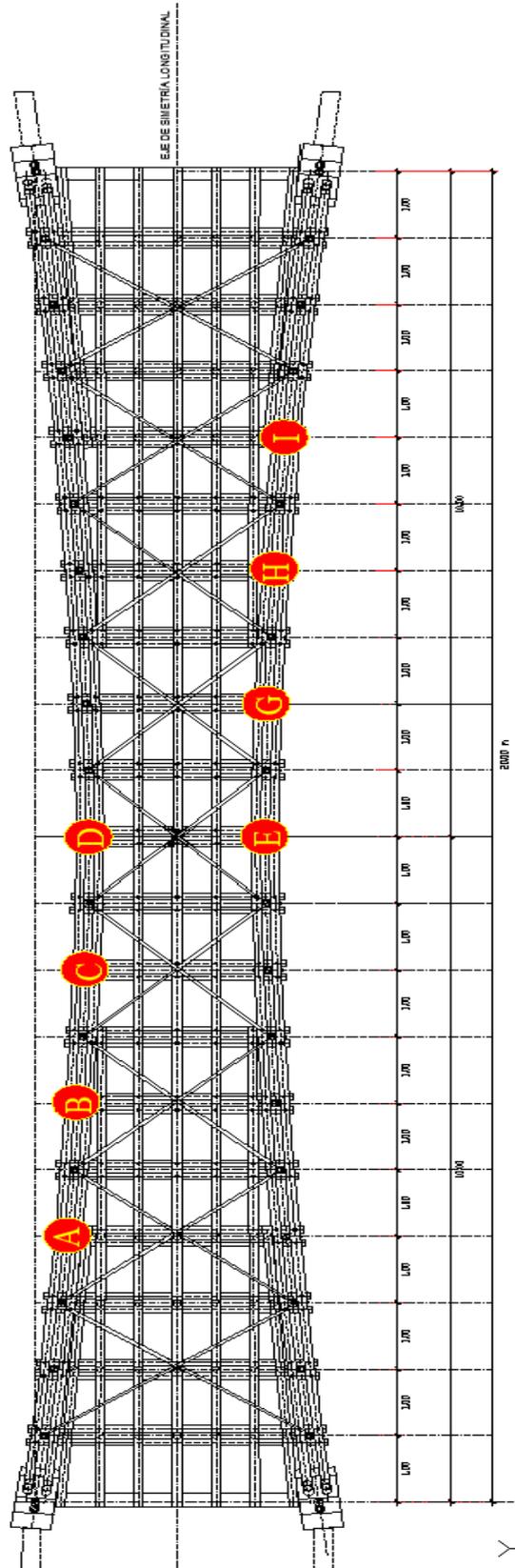


Figura 4.11 Esquema de ubicación de acelerómetros.

### Aplicación de carga dinámica y aceleraciones.

Se realizó 4 ensayos con diferentes cargas dinámicas, así como la aplicación de la carga estática de 700 kg fue aplicada solo para la mitad de estos ensayos.

**Tabla 21.**

Cargas Dinámicas y estáticas aplicadas en la estructura (Autor, 2014).

PRUEBA	CARGA ESTÁTICA	CARGA DINÁMICA
1	Ninguna	Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg a una velocidad de 0.5 segundos por salto.
2	700 kg (14 saquillos)	Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg a una velocidad de 0.5 segundos por salto.
3	Ninguna	Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg a una velocidad de 1 segundo por salto.
4	700 kg (14 saquillos)	Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg a una velocidad de 1 segundo por salto.

Una vez aplicada la carga dinámica por el lapso de un (1) minuto para cada ensayo dinámico, los datos de las aceleraciones fueron registrados en el computador, por cada acelerómetro se generó una serie de datos.

#### 4.3.5 Cálculos ensayo carga dinámica.

Se graficó los datos de las aceleraciones vs tiempo, aceleraciones en Gal en el eje Y, el tiempo en segundos sobre el eje X, así obtuve los **acelerogramas**.

Para la obtención del **espectro de frecuencia** se realizó el cálculo de los siguientes componentes:

Número de muestras: deberá ser un número potencia de dos y se representa con la letra **N**, se tomara el mayor número potencia de dos contenido en el número real de muestras tomadas en lapso de un minuto.

El período de muestreo se estableció acorde al número de muestras utilizadas, el período de muestreo se representa con **T**.

Tiempo entre puntos  $\Delta t$ : es el tiempo entre el registro de cada dato durante el lapso propuesto de un minuto

$$\Delta t = \frac{T}{N}$$

Frecuencia de muestreo  $f_s$ : es la frecuencia con la que se recolecto los datos dentro del lapso de un minuto propuesto.

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{N}{T}$$

Incremento de frecuencia  $\Delta f$ : es la resolución de frecuencia discreta la misma que se aumenta a si misma por cada muestra.

$$\Delta f = \frac{1}{T}$$

Frecuencia doblada  $f_{doblada}$ : es el valor máximo en el que la frecuencia discreta aumentara, el valor máximo será la mitad de la frecuencia de muestreo por el criterio de Nyquist.

$$f_{max} = f_{doblada} = \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2} * \Delta f$$

Se procesaron las series de datos de las aceleraciones con la herramienta de Microsoft Excel “análisis de Fourier” el cual utiliza el algoritmo Transformada rápida de Fourier (FFT), posteriormente se siguió el procedimiento detallado en el capítulo 3

del presente documento para la obtención del espectro de frecuencias, se debe realizar este procedimiento para las series de datos de todos los acelerómetros y para cada una de las 4 pruebas realizadas (Cimbala, 2010).

#### 4.3.6 Resultados ensayo carga dinámica.

##### Prueba N° 1: Acelerogramas

**Carga estática:** Ninguna

**Carga dinámica:** Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg

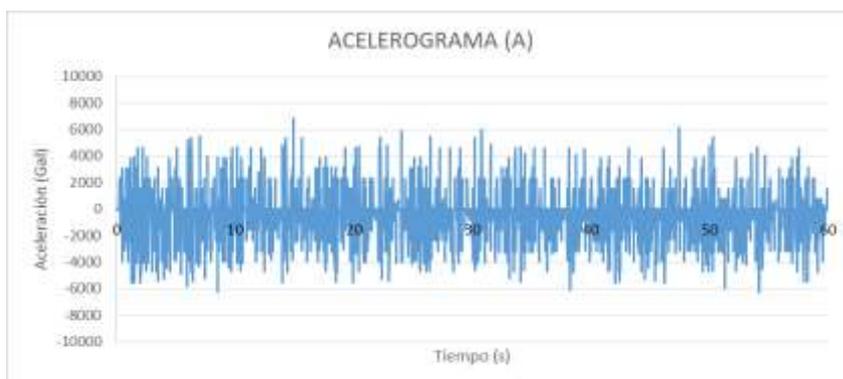
**Velocidad de saltos:** 0,5 segundos

**Duración:** 60 segundos

**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

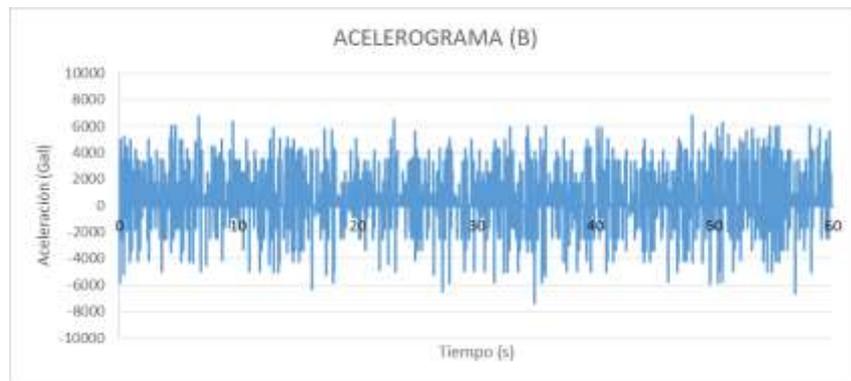
**Número de datos:** 3000 datos

**Acelerómetro:** A



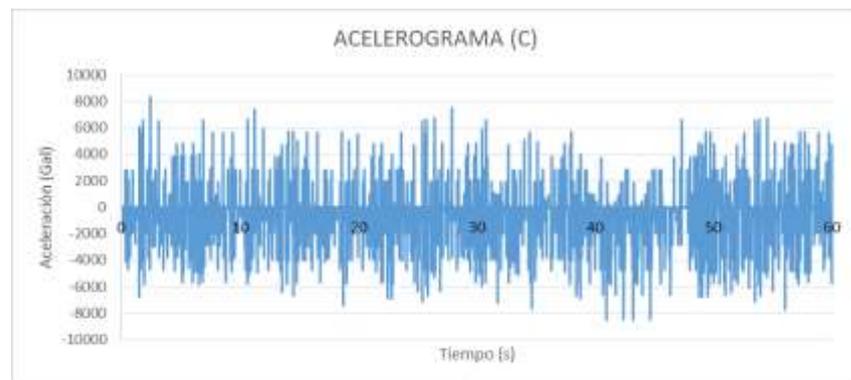
**Figura 4.12** Acelerograma sensor "A", carga dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro:** B



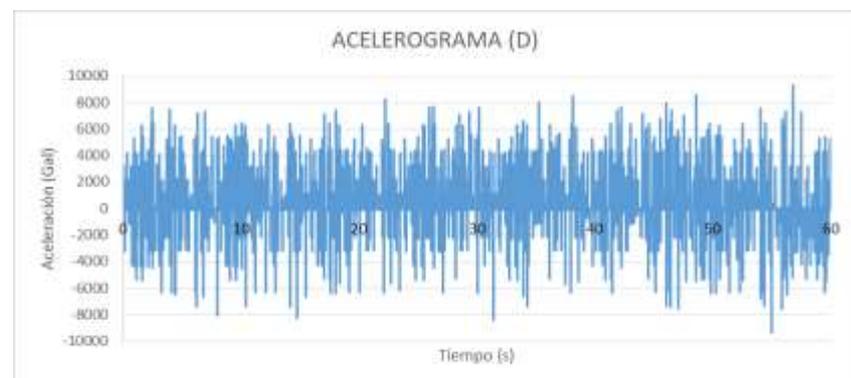
**Figura 4.13** Acelerograma sensor “B”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: C



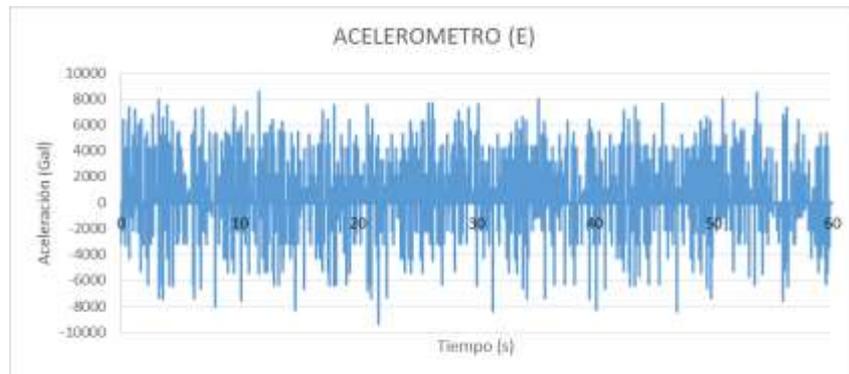
**Figura 4.14** Acelerograma sensor “C”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: D



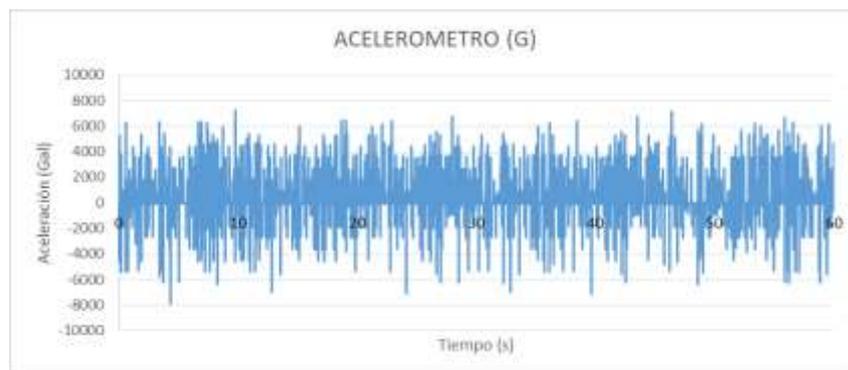
**Figura 4.15** Acelerograma sensor “D”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: E



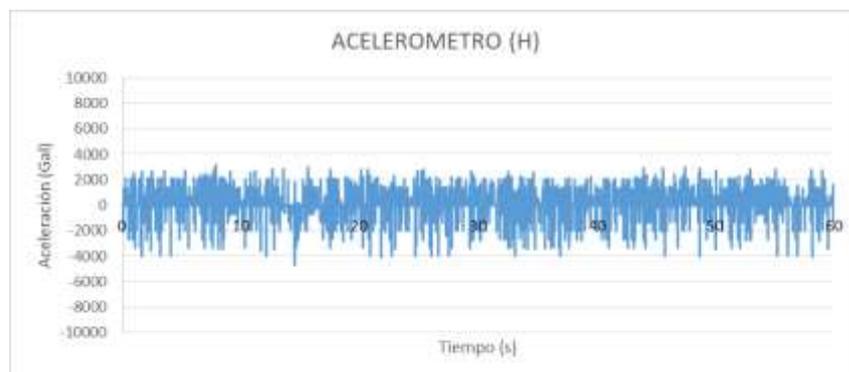
**Figura 4.16** Acelerograma sensor “E”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: G**



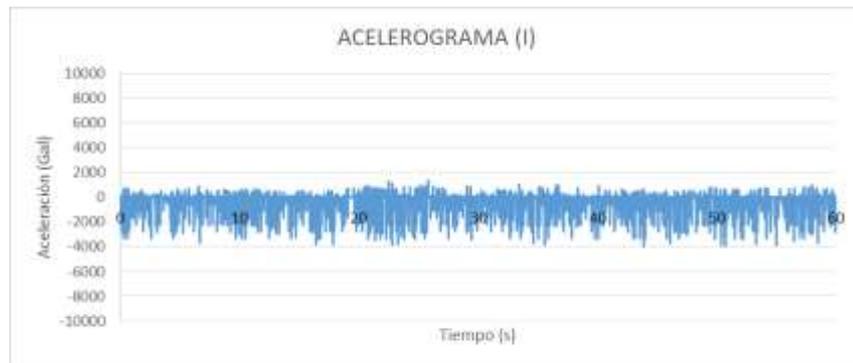
**Figura 4.17** Acelerograma sensor “G”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: H**



**Figura 4.18** Acelerograma sensor “H”, carga dinámica cada 0.5 s.

### Acelerómetro: I



**Figura 4.19** Acelerograma sensor “I”, carga dinámica cada 0.5 s.

### Prueba N° 1: Espectro de frecuencia

**Número de muestras:**  $2^{11} = 2048$

**Tiempo de muestreo:** 40.94 segundos

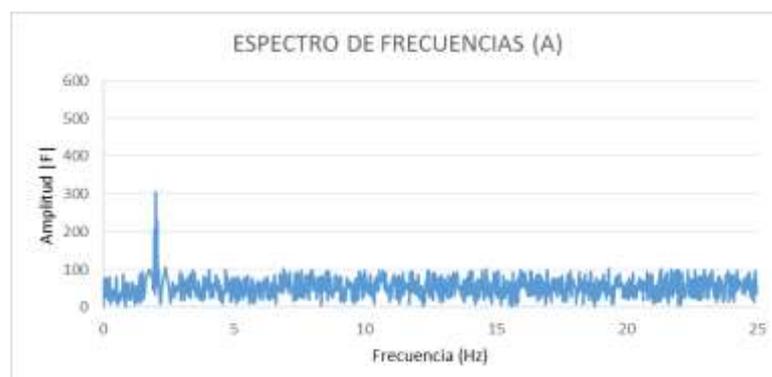
**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

**Frecuencia de muestreo:** 50.0244 hercios

**Incremento de frecuencia:** 0.0244

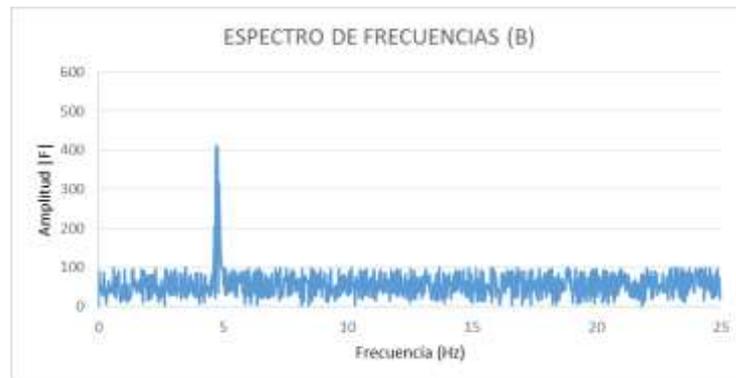
**Frecuencia doblada:** 25.0122 hercios

### Acelerómetro: A



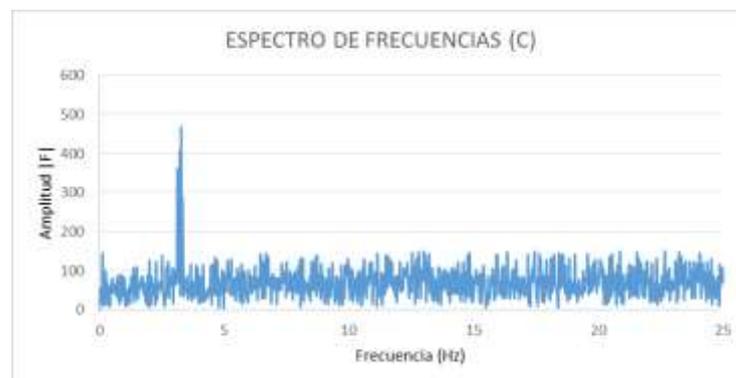
**Figura 4.20** Espectro de frecuencia “A”, carga dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: B**



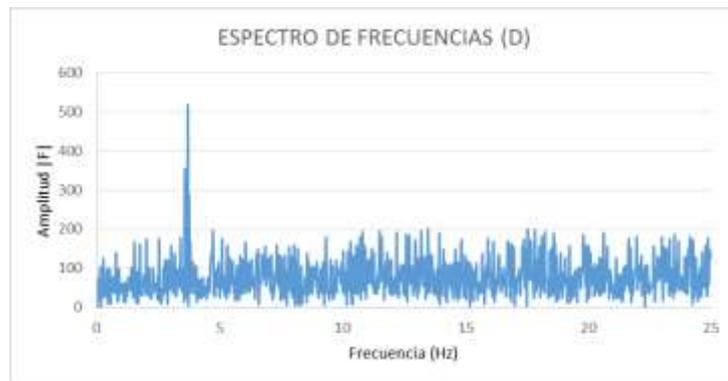
**Figura 4.21** Espectro de frecuencia “B”, carga dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: C**



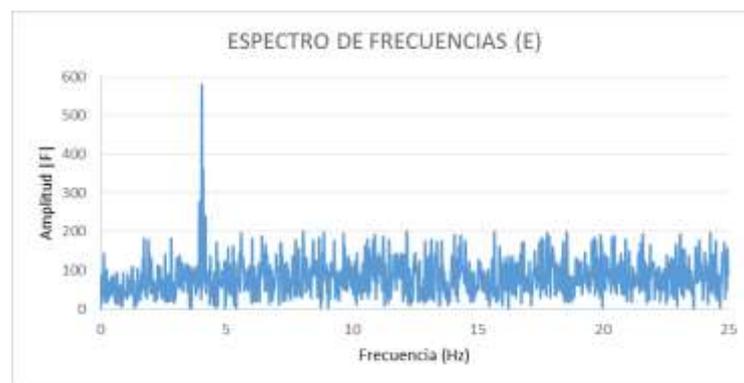
**Figura 4.22** Espectro de frecuencia “C”, carga dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: D**



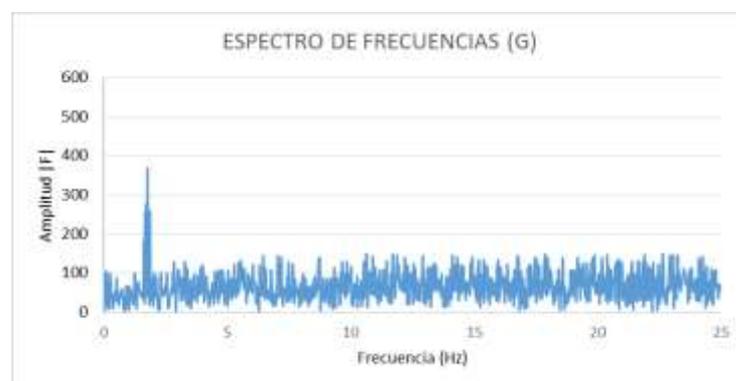
**Figura 4.23** Espectro de frecuencia “D”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: E**



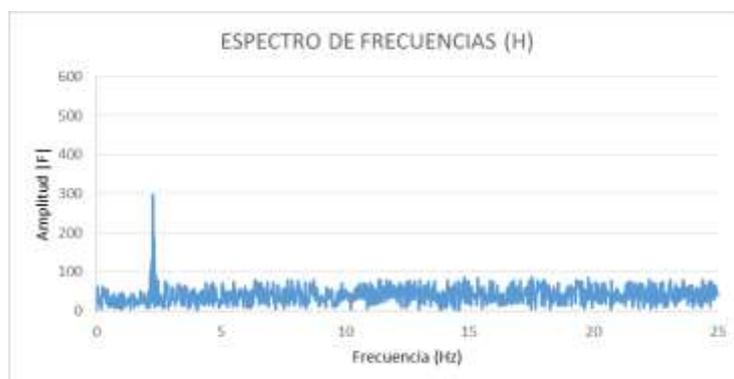
**Figura 4.24** Espectro de frecuencia “E”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: G**



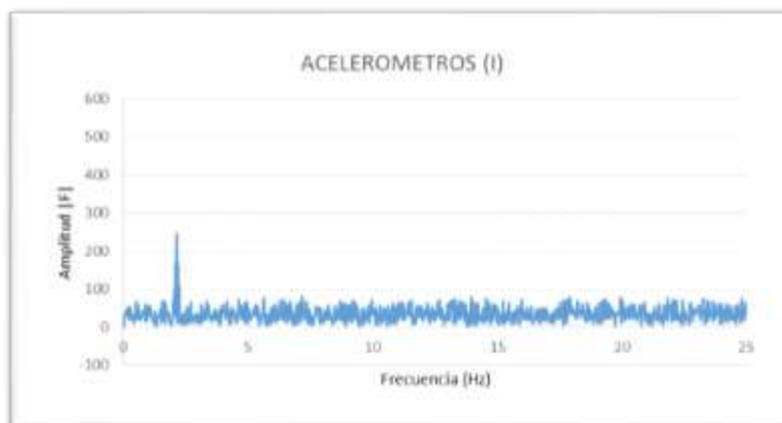
**Figura 4.25** Espectro de frecuencia “G”, carga dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: H**



**Figura 4.26** Espectro de frecuencia “H”, carga dinámica cada 0.5 s.

### **Acelerómetro: I**



**Figura 4.27** Espectro de frecuencia “I”, carga dinámica cada 0.5 s.

### **Prueba N° 2: Acelerogramas**

**Carga estática:** 700 kg

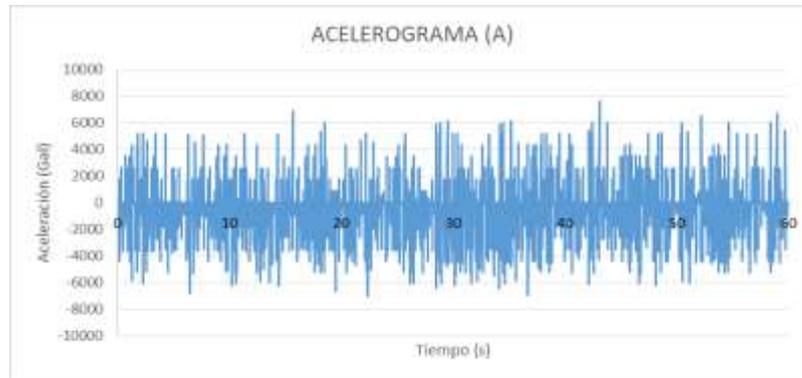
**Carga dinámica:** Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg

**Velocidad de saltos:** 0,5 segundos

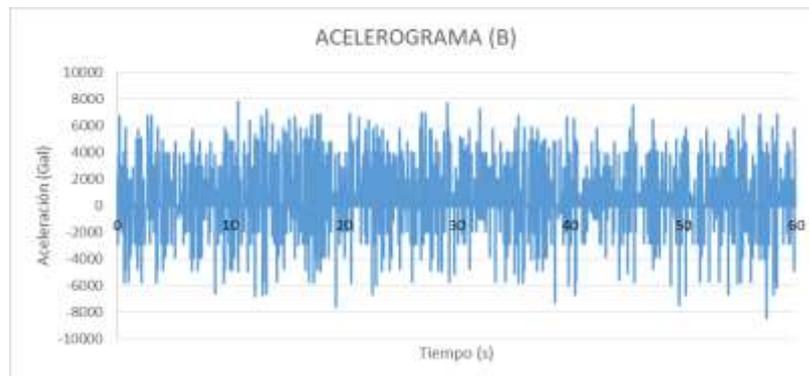
**Duración:** 60 segundos

**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

**Número de datos:** 3000 datos

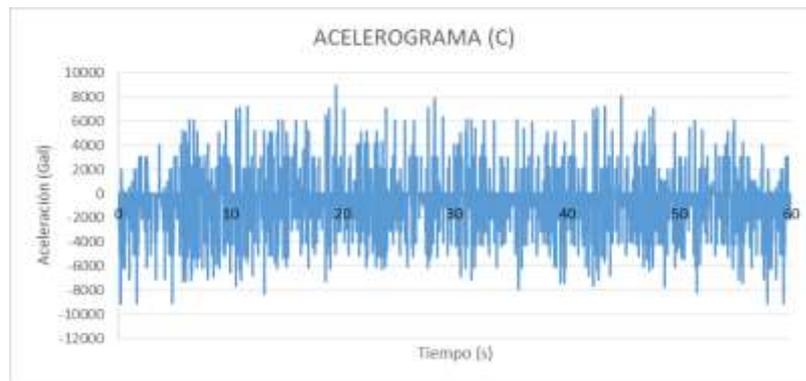
**Acelerómetro: A**

**Figura 4.28** Acelerograma sensor “A”, carga estática y dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: B**

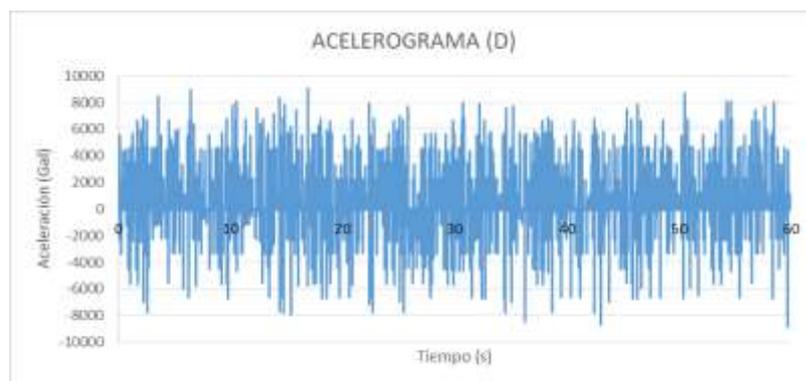
**Figura 4.29** Acelerograma sensor “B”, carga estática y dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: C**



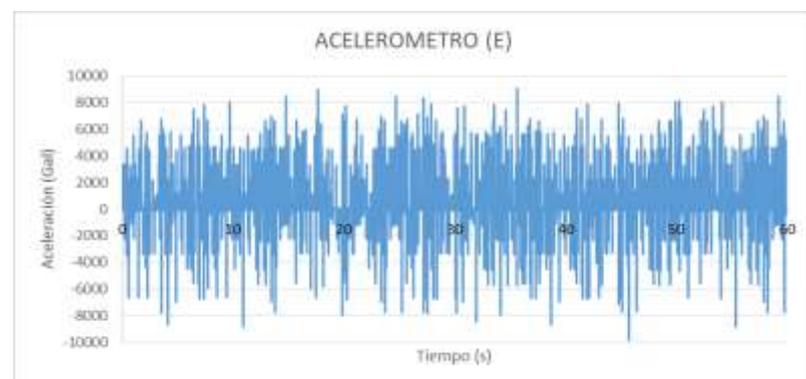
**Figura 4.30** Acelerograma sensor "C", carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: D**



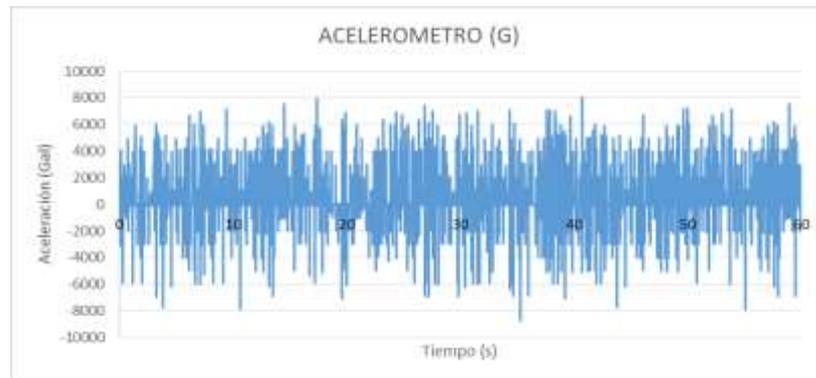
**Figura 4.31** Acelerograma sensor "D", carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: E**



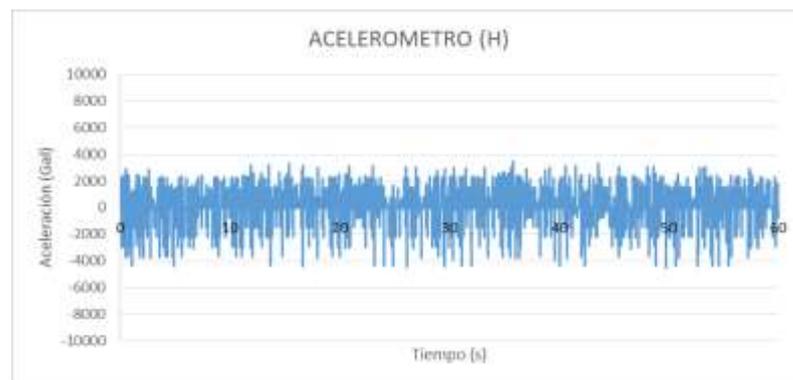
**Figura 4.32** Acelerograma sensor "E", carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### **Acelerómetro: G**



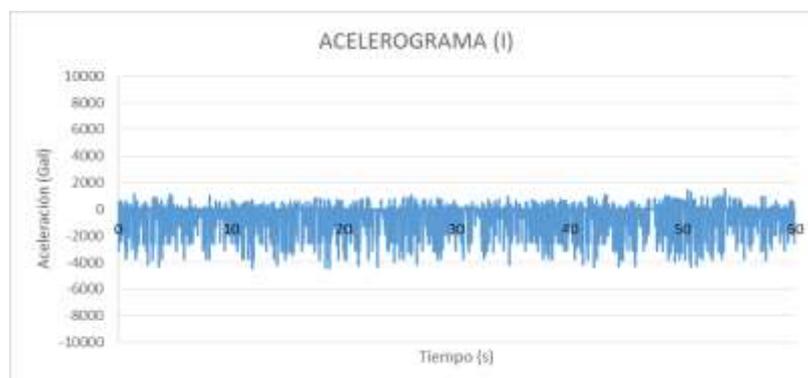
**Figura 4.33** Acelerograma sensor “G”, carga estática y dinámica cada 0.5 s.

### Acelerómetro: H



**Figura 4.34** Acelerograma sensor “H”, carga estática y dinámica cada 0.5 s.

### Acelerómetro: I



**Figura 4.35** Acelerograma sensor “I”, carga estática y dinámica cada 0.5 s.

## Prueba N° 2: Espectro de frecuencia

**Número de muestras:**  $2^{11} = 2048$

**Tiempo de muestreo:** 40.94 segundos

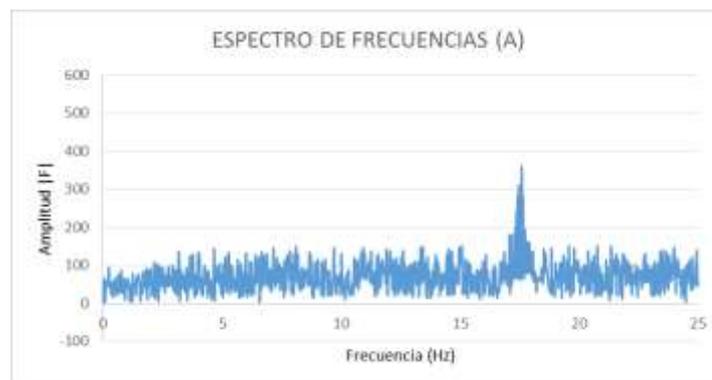
**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

**Frecuencia de muestreo:** 50.0244 hercios

**Incremento de frecuencia:** 0.0244

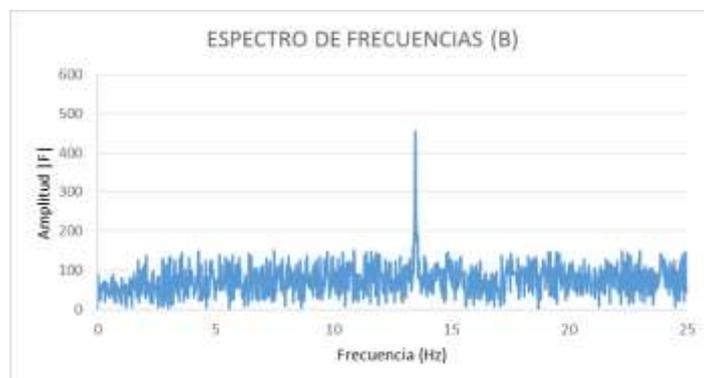
**Frecuencia doblada:** 25.0122 hercios

**Acelerómetro: A**

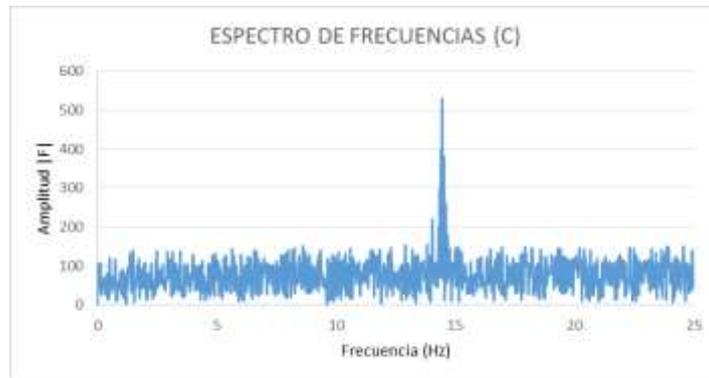


**Figura 4.36** Espectro de frecuencia “A” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

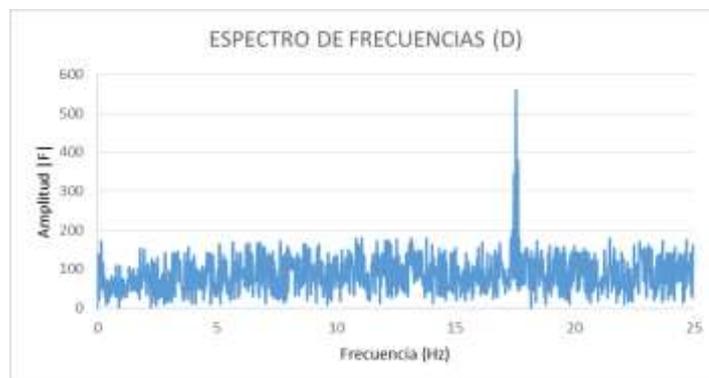
**Acelerómetro: B**



**Figura 4.37** Espectro de frecuencia “B” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

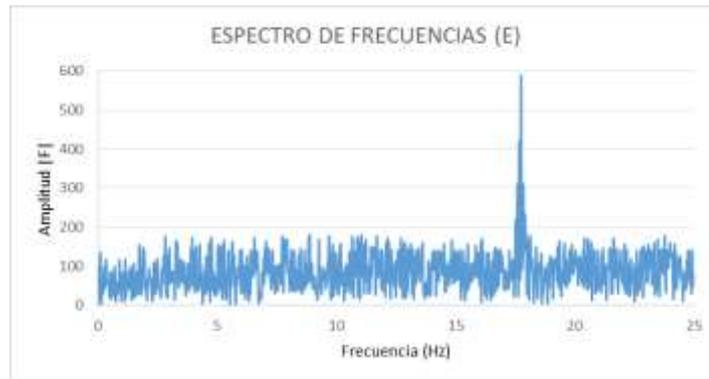
**Acelerómetro: C**

**Figura 4.38** Espectro de frecuencia “C” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: D**

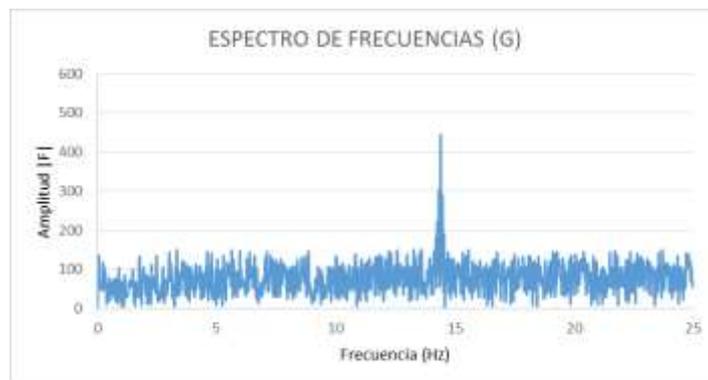
**Figura 4.39** Espectro de frecuencia “D” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

**Acelerómetro: E**



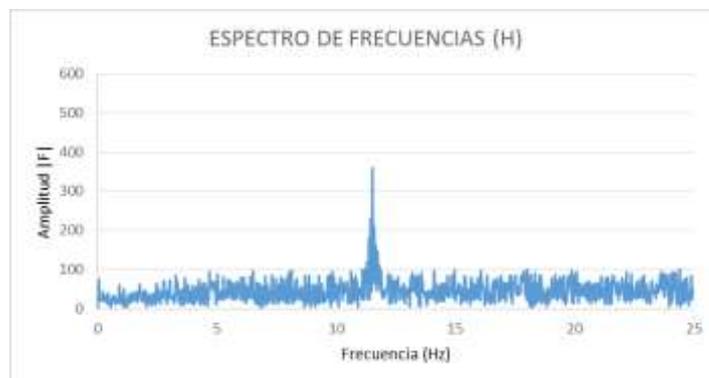
**Figura 4.40** Espectro de frecuencia “E” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: G



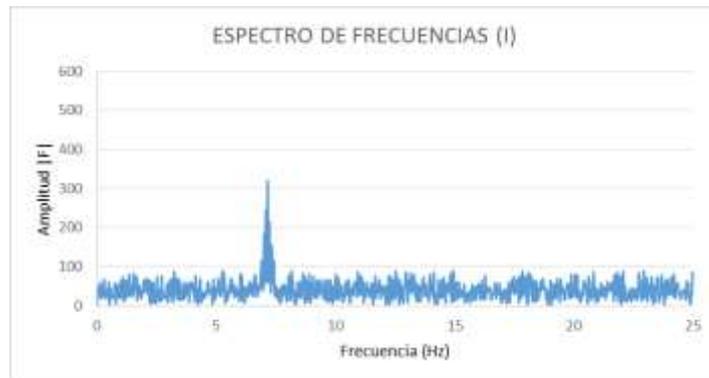
**Figura 4.41** Espectro de frecuencia “G” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: H



**Figura 4.42** Espectro de frecuencia “H” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

#### Acelerómetro: I



**Figura 4.43** Espectro de frecuencia “I” carga estática y dinámica cada 0.5 s.

### Prueba N° 3: Acelerogramas

**Carga estática:** Ninguna

**Carga dinámica:** Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg

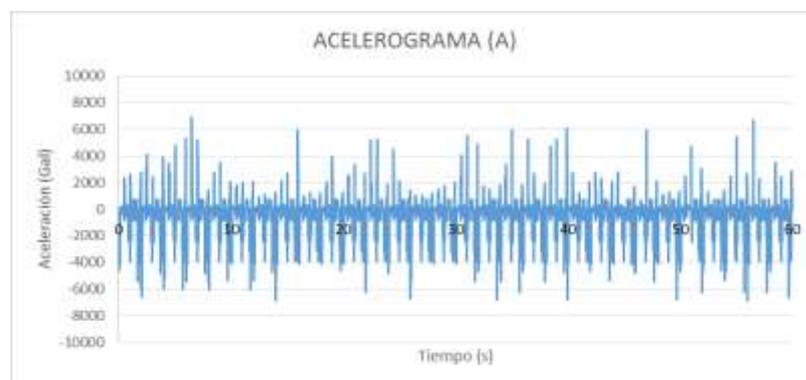
**Velocidad de saltos:** 1.0 segundos

**Duración:** 60 segundos

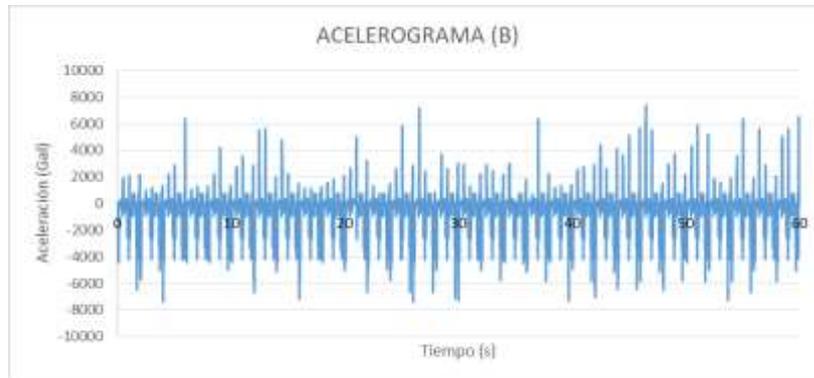
**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

**Número de datos:** 3000 datos

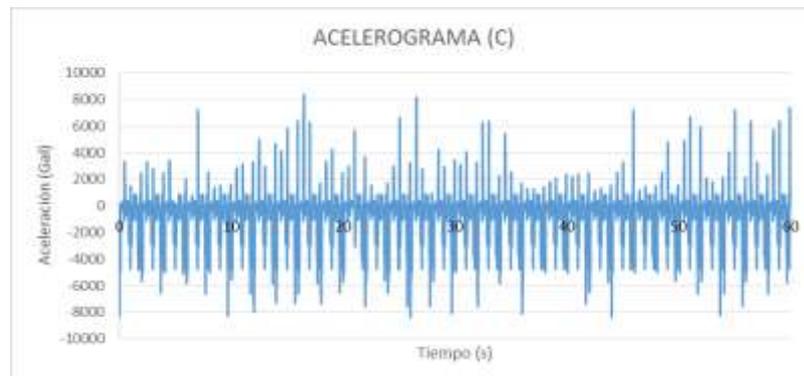
**Acelerómetro:** A



**Figura 4.44** Acelerograma sensor “A”, carga dinámica cada 1.0 s.

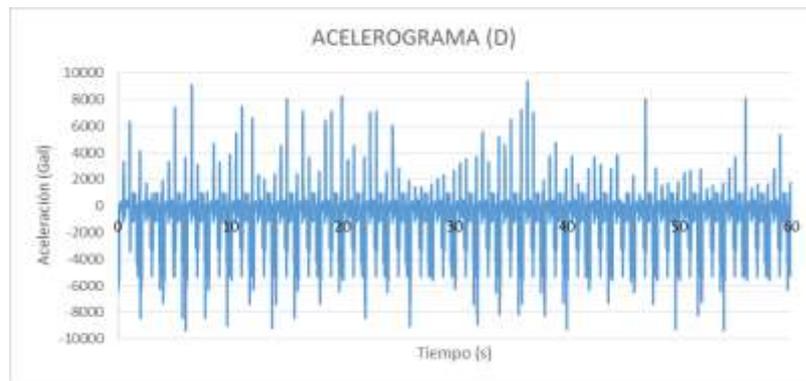
**Acelerómetro: B**

**Figura 4.45** Acelerograma sensor "B", carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: C**

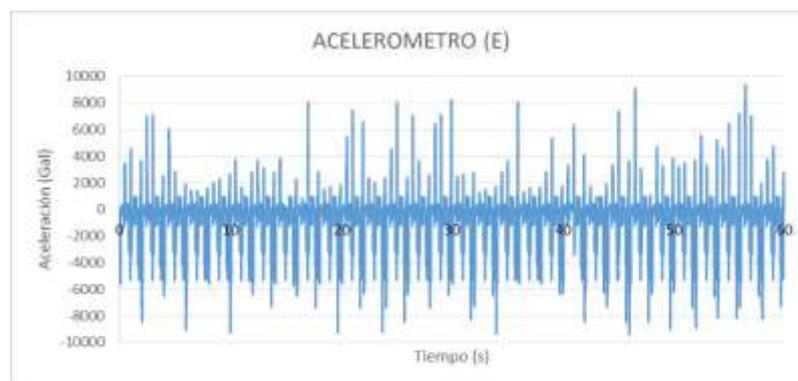
**Figura 4.46** Acelerograma sensor "C", carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: D**



**Figura 4.47** Acelerograma sensor “D”, carga dinámica cada 1.0 s.

#### **Acelerómetro: E**



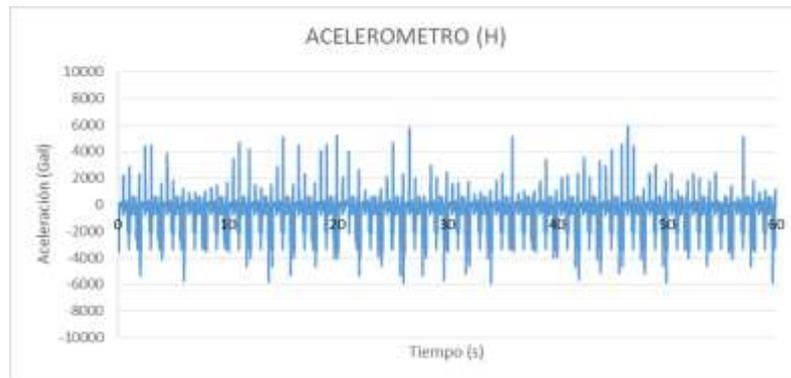
**Figura 4.48** Acelerograma sensor “E”, carga dinámica cada 1.0 s.

#### **Acelerómetro: G**



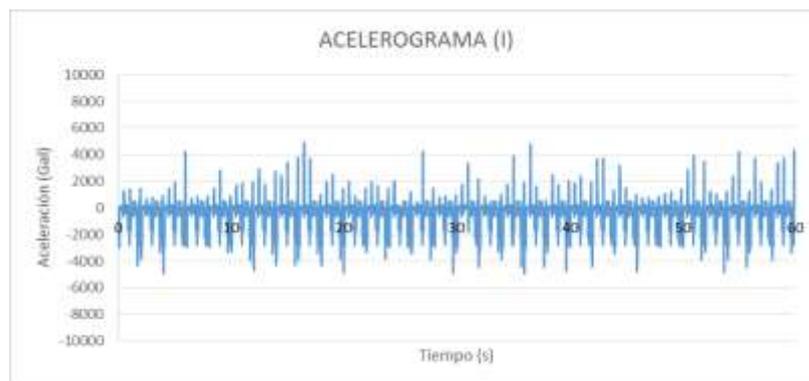
**Figura 4.49** Acelerograma sensor “G”, carga dinámica cada 1.0 s.

#### **Acelerómetro: H**



**Figura 4.50** Acelerograma sensor “H”, carga dinámica cada 1.0 s.

### **Acelerómetro: I**



**Figura 4.51** Acelerograma sensor “I”, carga dinámica cada 1.0 s.

### **Prueba N° 3: Espectro de frecuencia**

**Número de muestras:**  $2^{11} = 2048$

**Tiempo de muestreo:** 40.94 segundos

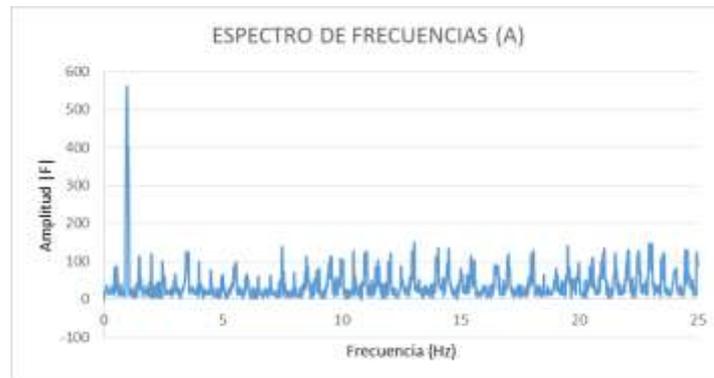
**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

**Frecuencia de muestreo:** 50.0244 hercios

**Incremento de frecuencia:** 0.0244

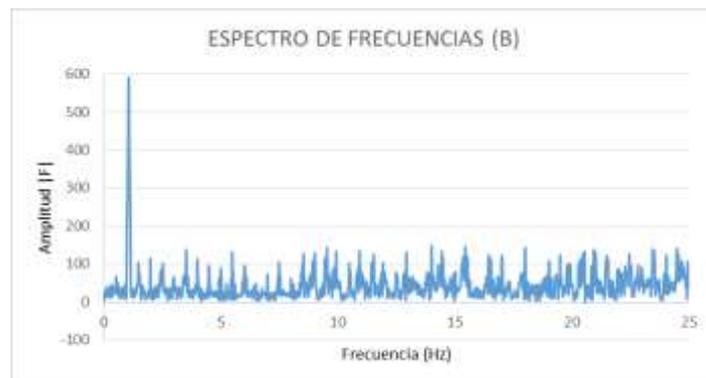
**Frecuencia doblada:** 25.0122 hercios

**Acelerómetro: A**



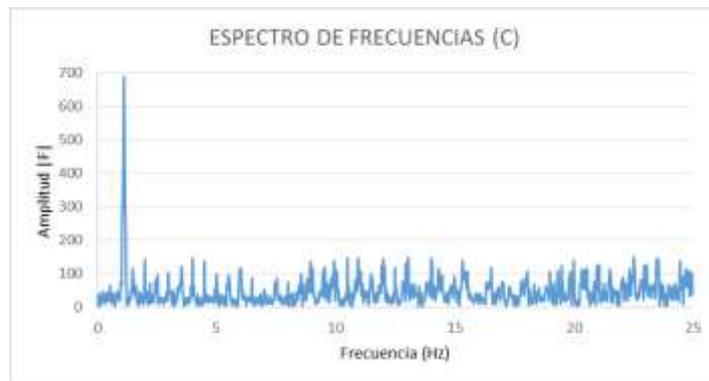
**Figura 4.52** Espectro de frecuencia “A” carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: B**



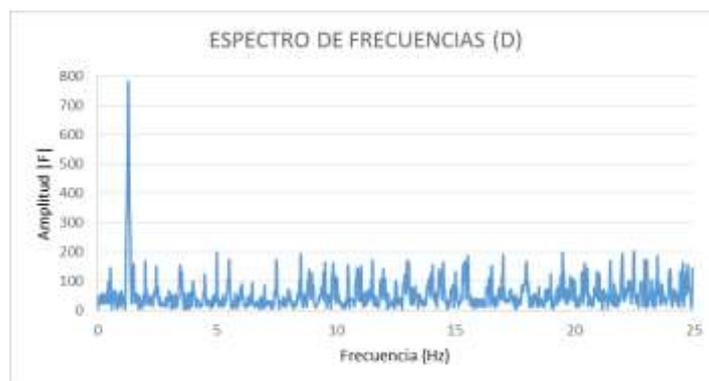
**Figura 4.53** Espectro de frecuencia “B” carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: C**



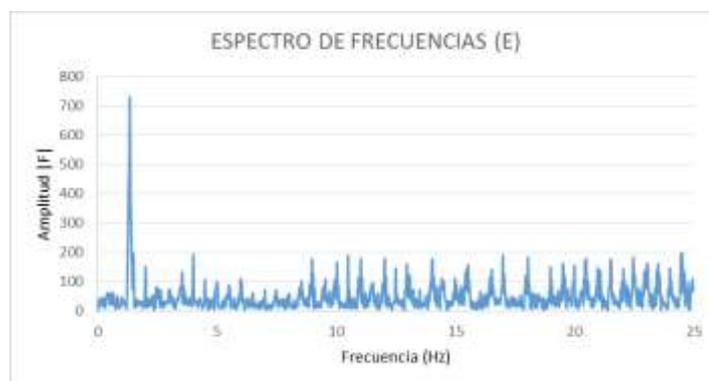
**Figura 4.54** Espectro de frecuencia "C" carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: D**



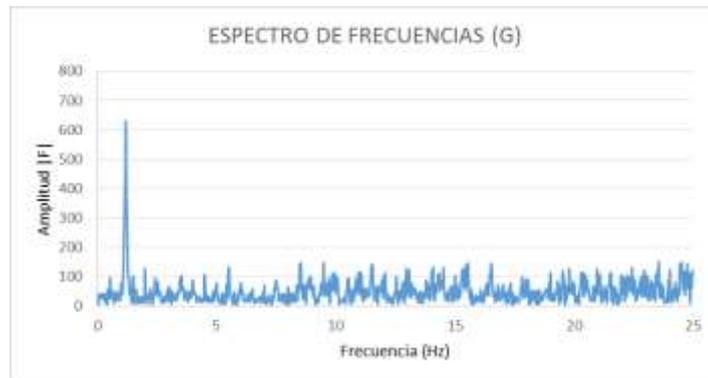
**Figura 4.55** Espectro de frecuencia "D" carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: E**



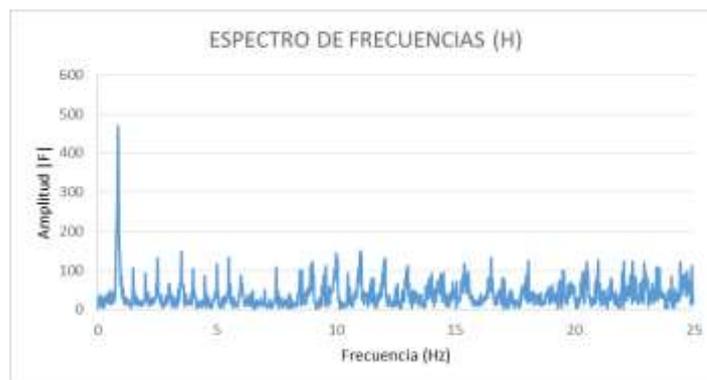
**Figura 4.56** Espectro de frecuencia "E" carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: G**



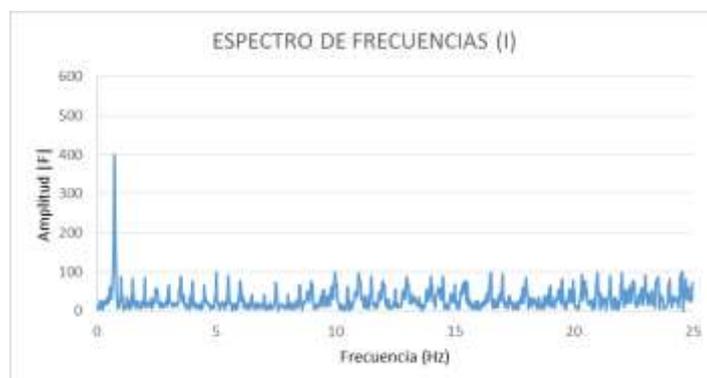
**Figura 4.57** Espectro de frecuencia “G” carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: H**



**Figura 4.58** Espectro de frecuencia “H” carga dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: I**



**Figura 4.59** Espectro de frecuencia “I” carga dinámica cada 1.0 s.

**Prueba N° 4: Acelerogramas**

**Carga estática:** 700 kg

**Carga dinámica:** Saltos oscilatorios de 4 personas de 75 kg promedio cada una, carga total de 300 kg

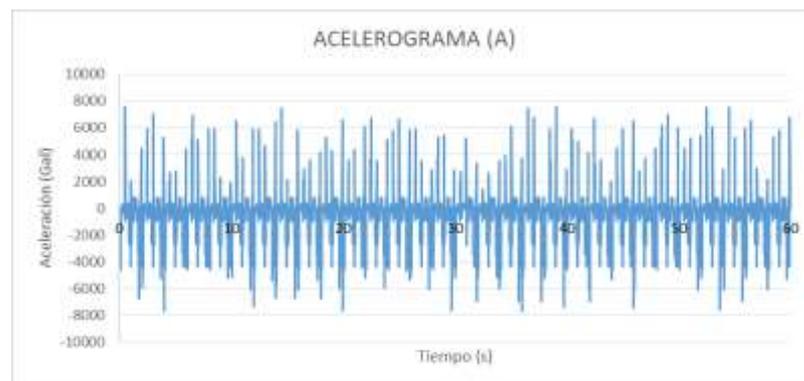
**Velocidad de saltos:** 1.0 segundos

**Duración:** 60 segundos

**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

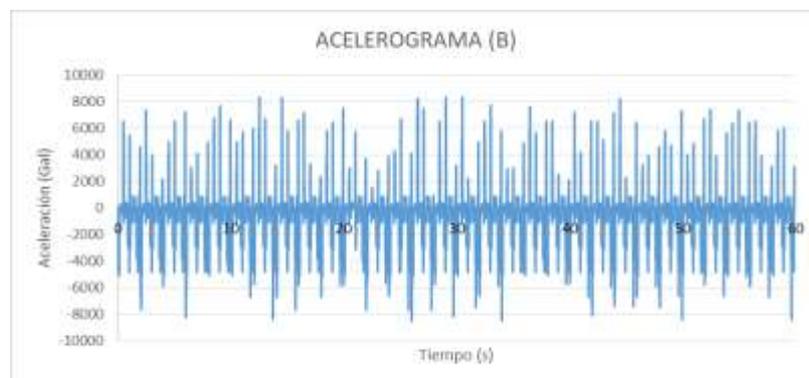
**Número de datos:** 3000 datos

**Acelerómetro: A**

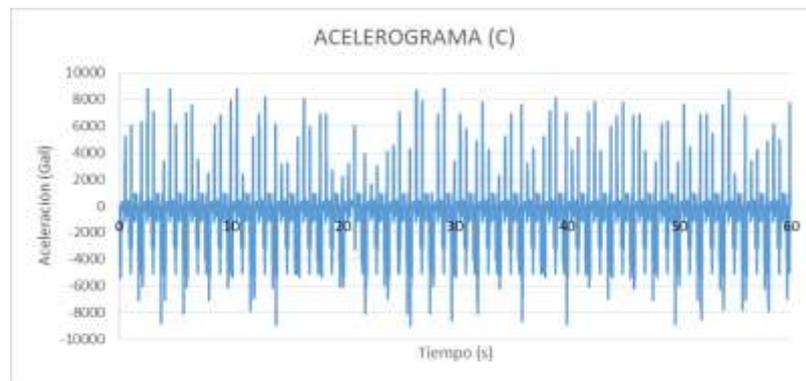


**Figura 4.60** Acelerograma sensor "A", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

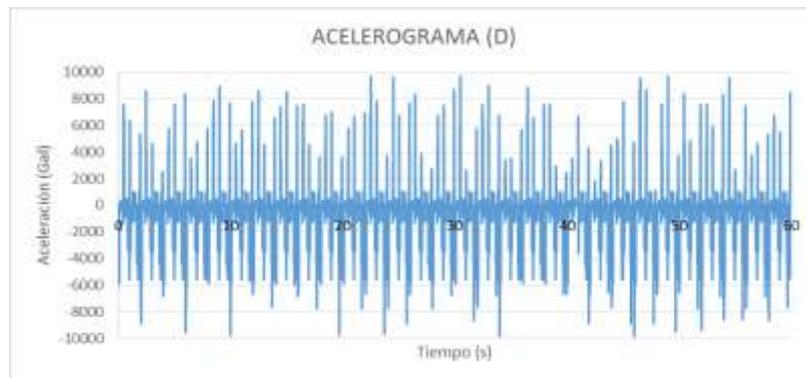
**Acelerómetro: B**



**Figura 4.61** Acelerograma sensor "B", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

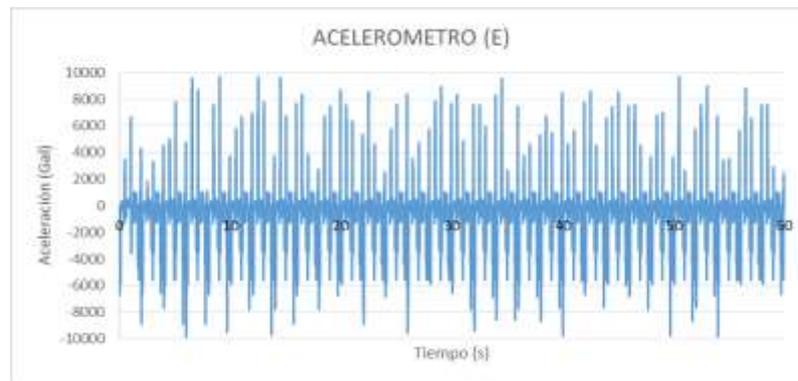
**Acelerómetro: C**

**Figura 4.62** Acelerograma sensor "C", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: D**

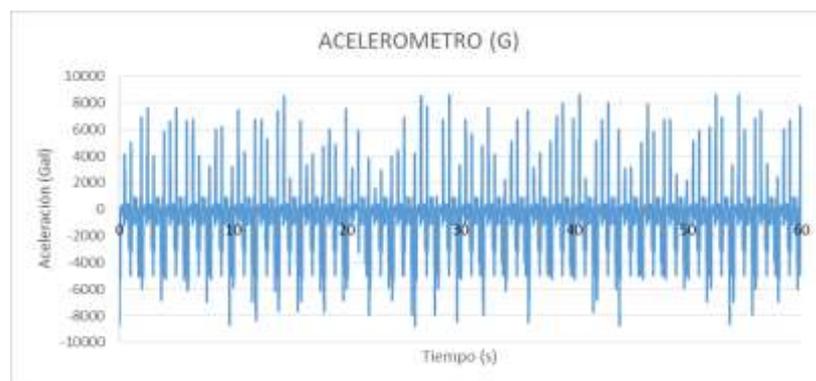
**Figura 4.63** Acelerograma sensor "D", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: E**



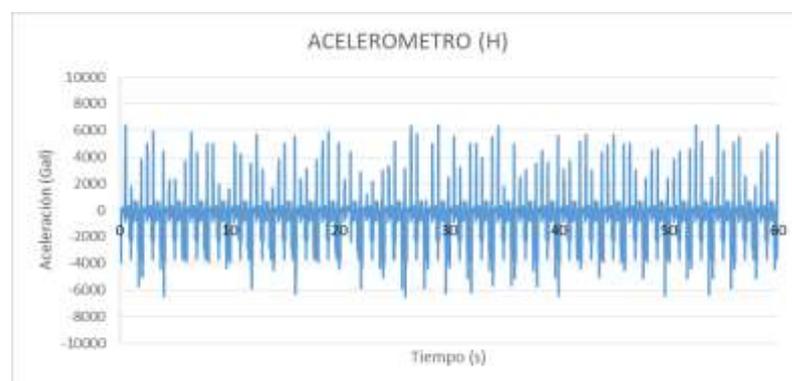
**Figura 4.64** Acelerograma sensor "E", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

#### **Acelerómetro: G**

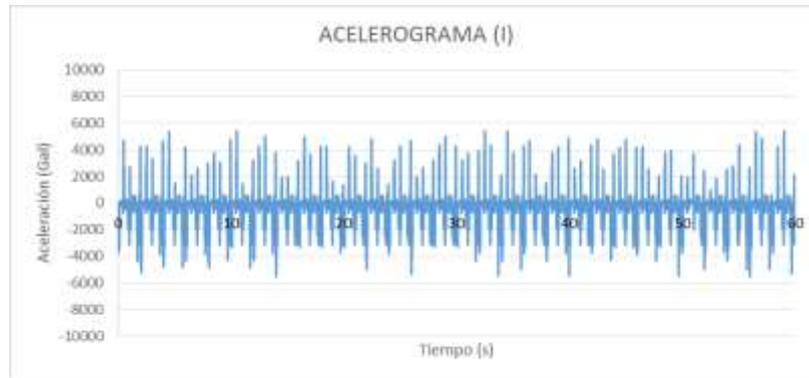


**Figura 4.65** Acelerograma sensor "G", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

#### **Acelerómetro: H**



**Figura 4.66** Acelerograma sensor "H", carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: I**

**Figura 4.67** Acelerograma sensor “I”, carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Prueba N° 4: Espectro de frecuencia**

**Número de muestras:**  $2^{11} = 2048$

**Tiempo de muestreo:** 40.94 segundos

**Tiempo entre puntos:** 0.02 segundos

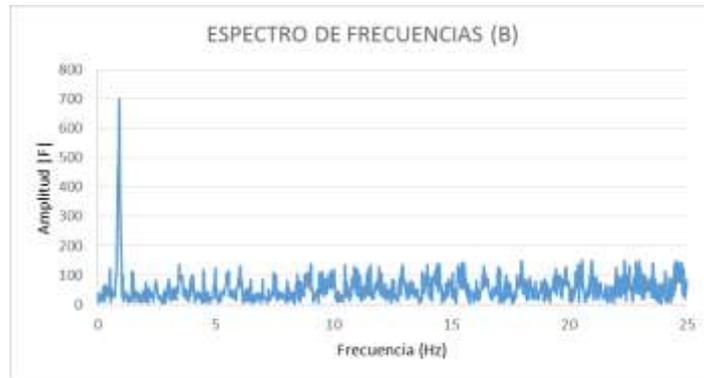
**Frecuencia de muestreo:** 50.0244 hercios

**Incremento de frecuencia:** 0.0244

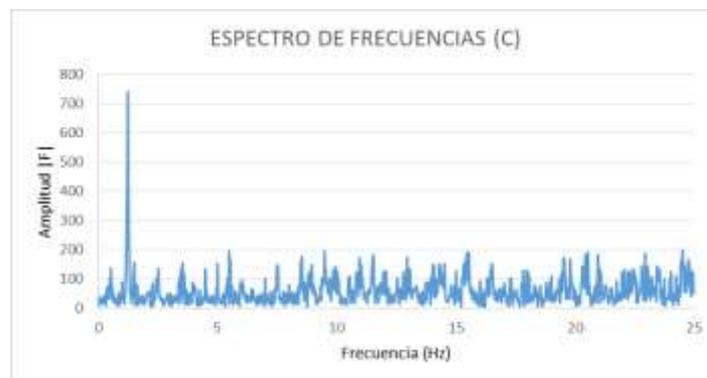
**Frecuencia doblada:** 25.0122 hercios

**Acelerómetro: A**

**Figura 4.68** Espectro de frecuencia “A” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: B**

**Figura 4.69** Espectro de frecuencia “B” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: C**

**Figura 4.70** Espectro de frecuencia “C” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: D**

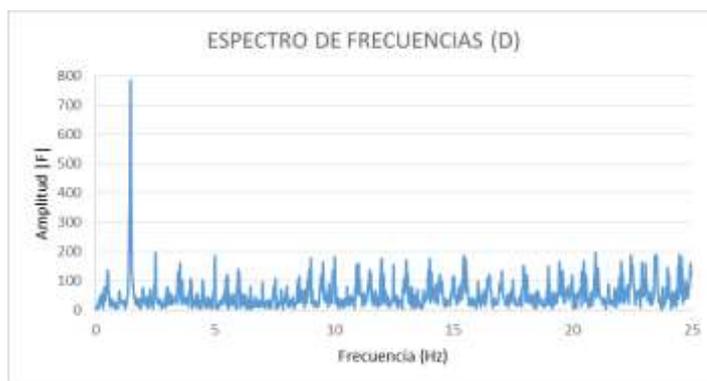


Figura 4.71 Espectro de frecuencia “D” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

#### Acelerómetro: E

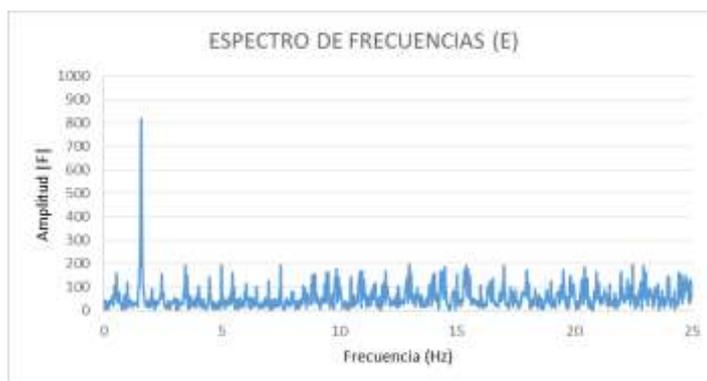


Figura 4.72 Espectro de frecuencia “E” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

#### Acelerómetro: G

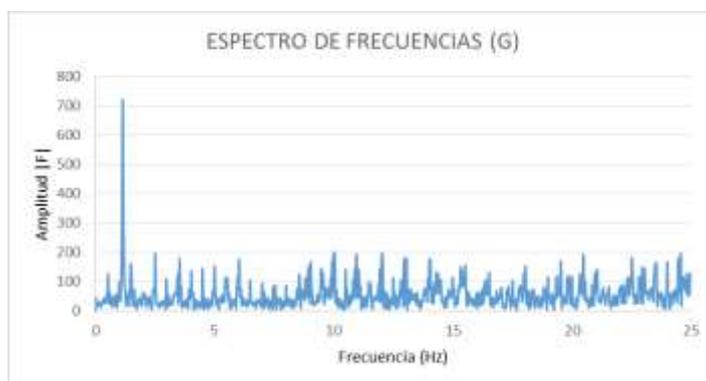
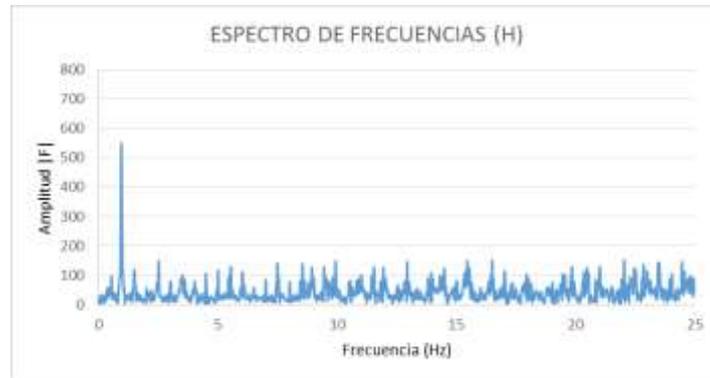


Figura 4.73 Espectro de frecuencia “G” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: H**

**Figura 4.74** Espectro de frecuencia “H” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

**Acelerómetro: I**

**Figura 4.75** Espectro de frecuencia “I” carga estática y dinámica cada 1.0 s.

## **CAPÍTULO V: MODELO ANALÍTICO.**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

El modelo analítico consiste en recrear los ensayos experimentales descritos en el capítulo cuatro sobre la estructura de GAK, para realizar el modelo analítico tomaremos en consideración la geometría real encontrada en el puente, la carga estática así como la carga dinámica a la que fue sometida el puente en los ensayos experimentales, también se consideran las cargas de la estructura como el peso propio de los materiales que la constituyen, para completar el modelo analítico hacemos uso de datos teóricos como la masa por volumen, el módulo de elasticidad y la resistencia a los diferentes esfuerzos de la GAK.

El modelo analítico usualmente es utilizado para el diseño y dimensionamiento de estructuras aplicando combinaciones de cargas sobre los elementos de la estructura con el fin de encontrar los esfuerzos internos en dichos elementos y así poder asignar un área suficiente para soportar estas solicitaciones, en este caso iremos hacia atrás, es decir simularemos un evento que sucedió y se asignara la geometría de una construcción ya existente.

Expresamos de forma efectiva la desagregación de todos los elementos compuestos de la estructura, también se pretende descomponer las juntas, permitiendo observar de forma más detallada la interacción de los elementos que la conforman y su funcionamiento.

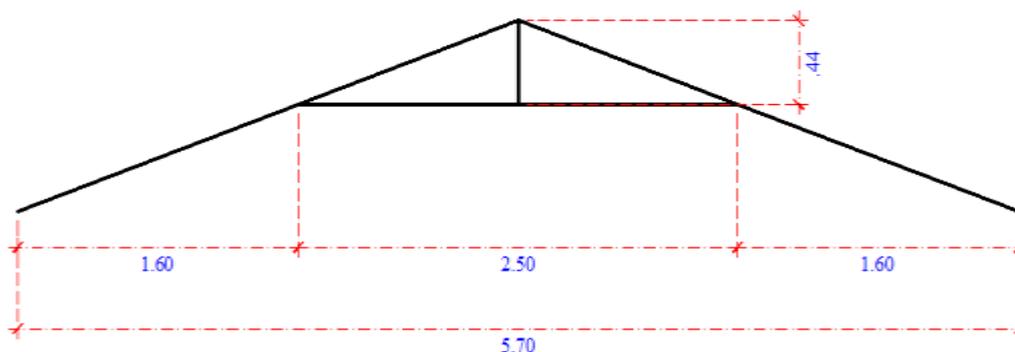
Para generar los modelos analíticos utilizaremos software especializado AutoCAD 2013 para dibujar la geometría de la estructura, así como un software especializado para el análisis y diseño estructural SAP2000 V.17 que servirá para la aplicación de cargas y determinar las deflexiones obtenidas tras la aplicación de la carga estática, así mismo el período de vibración de la estructura después de la aplicación de la carga dinámica.

## 5.2 ELABORACIÓN MODELO ANALÍTICO

### 5.2.1 Dibujo del modelo en AutoCAD 2013

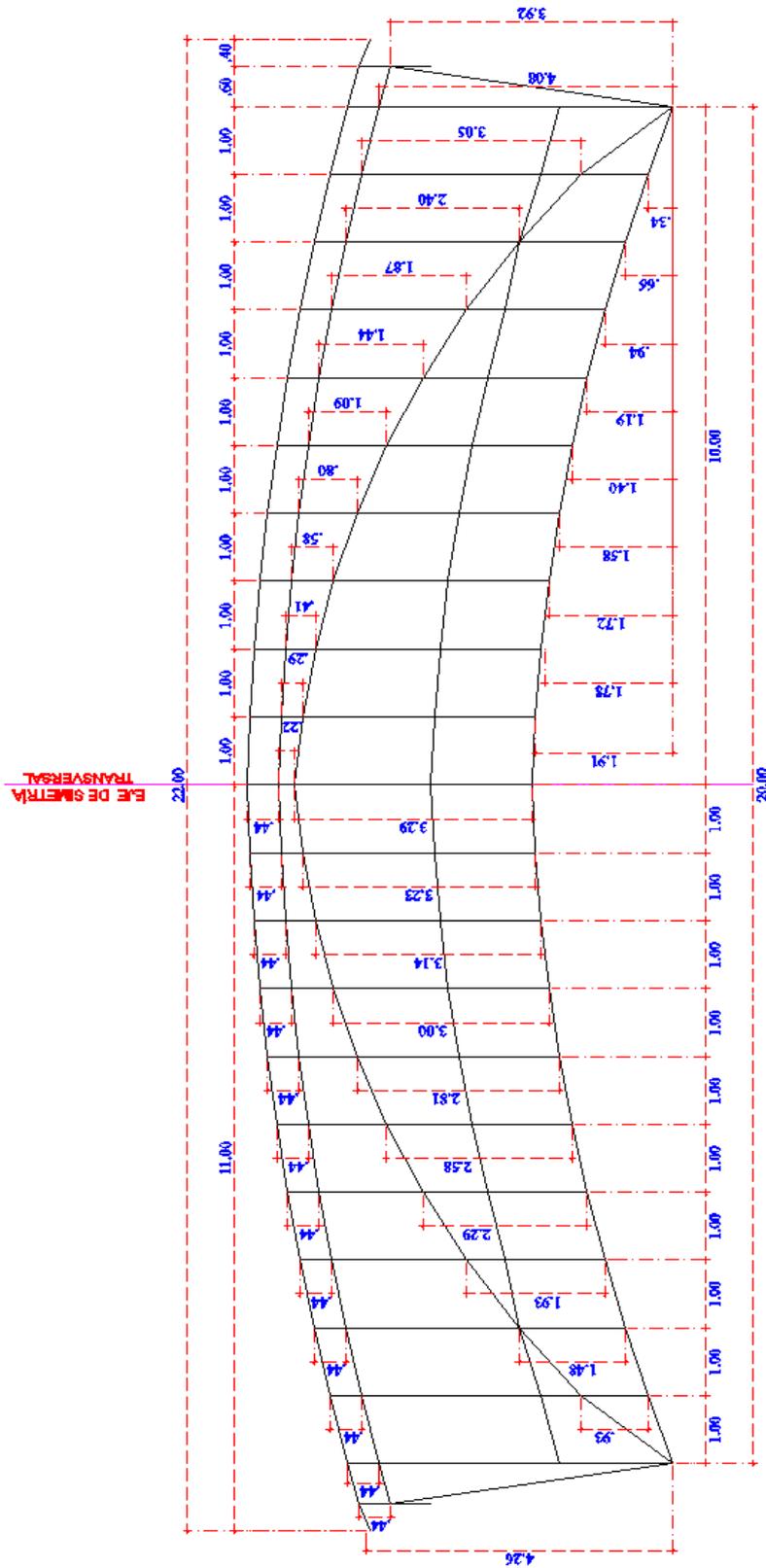
Como se mencionó, partí de la geometría encontrada en nuestra visita al puente de GAK en la hacienda “Las Delicias”, se tomaron en cuenta solo los elementos de GAK, con la ayuda del software AutoCAD 2013 dibuje la estructura con mucho detalle en las dimensiones de los elementos.

Los elementos de la cubierta del puente, se detallan en la **figura 5.1** a continuación así como sus dimensiones, los elementos de la cubierta se repiten exactamente para cada sección transversal del puente.



**Figura 5.1.** Detalle de la estructura de la cubierta del puente de GAK y sus dimensiones elaborada en AutoCAD 2013.

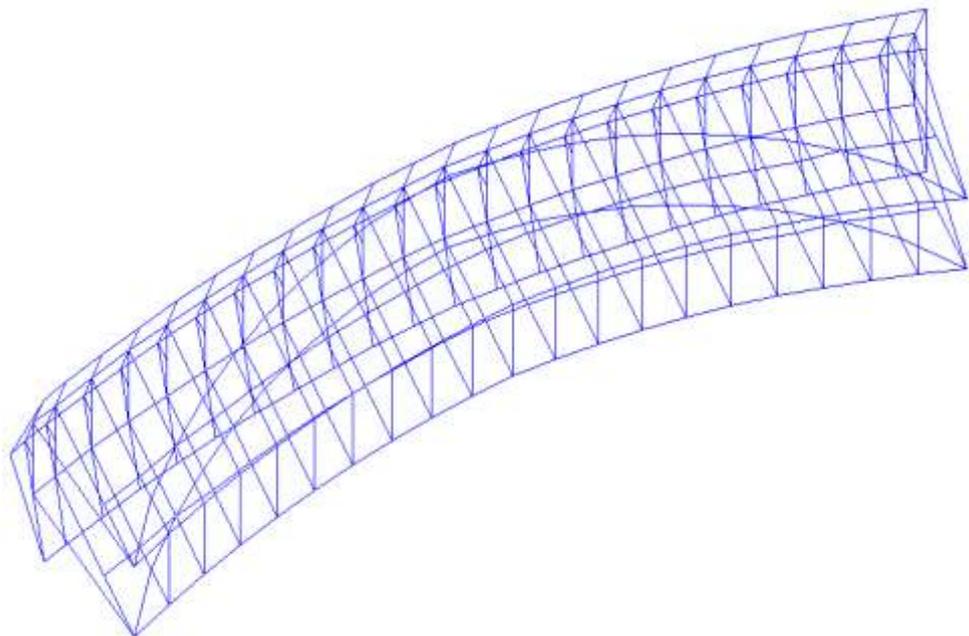
Tanto el grafico como el modelamiento de la estructura se realizó en un modelo 3D, pero por facilidad al dibujar, inicié graficando la fachada lateral longitudinal del puente en un modelo 2D, en la **figura 5.2** a continuación se muestra los elementos de GAK y sus dimensiones.



**Figura 5.2.** Fachada lateral longitudinal de estructura de GAK y sus dimensiones elaborada en AutoCAD 2013.

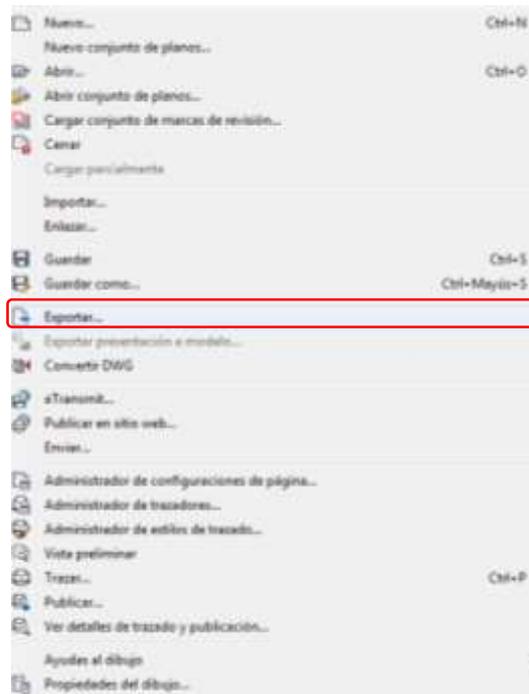
El siguiente paso es activar el modelamiento 3D el método más sencillo es mantener presionado la tecla “Shift” simultáneamente la rueda “scroll” del ratón y se mueve el cursor, seleccioné todos los elementos graficados y con la ayuda del comando copiar, realicé un duplicado de los elementos sobre el eje Z, a 2.5 metros de distancia en forma paralela a los originales.

Se conectó las dos cerchas longitudinales mediante los elementos de la cubierta descrita en la (figura 5.1), además se conectaron los nudos inferiores con las viguetas donde se apoyara el tablero peatonal de la estructura conformando así cada una de las secciones transversales, termine conectando las secciones transversales entre ellas con elementos longitudinales hasta conseguir la estructura completa.



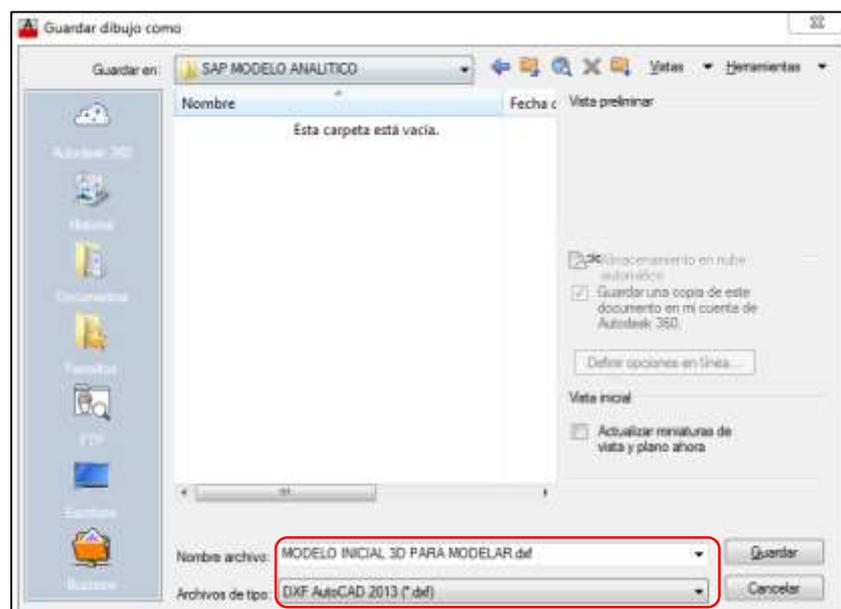
**Figura 5.3.** Estructura completa en 3D dibujada con AutoCAD 2013.

Una vez obtenido este dibujo, lo use como plantilla para generar un modelo del puente en el programa SAP2000, y así empezar con el análisis estructural, se exportó el dibujo, en formato DXF desde el AutoCAD 2013.



**Figura 5.4.** Menú Archivo opción Exportar AutoCAD 2013.

Se abre una ventana auxiliar para exportar, se selecciona tipo .dxf e hice clic en guardar.



**Figura 5.5.** Ventana auxiliar para exportar el dibujo a SAP2000 desde AutoCAD 2013.

## 5.2.2 Importación del modelo a SAP2000.

Ya en el programa SAP2000, se realizó un proceso similar desde el menú Archivo el submenú Importar, y a su vez la opción de archivos desde AutoCAD .dxf.

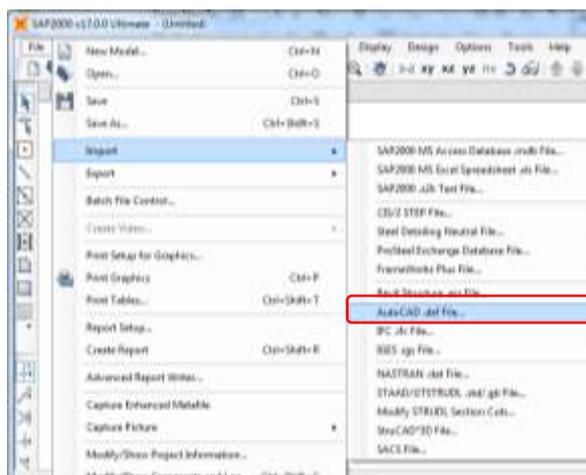


Figura 5.6. Menú archivo opción Importar SAP2000.

Se abre una ventana auxiliar para seleccionar el archivo .dxf en el cual se desea trabajar.

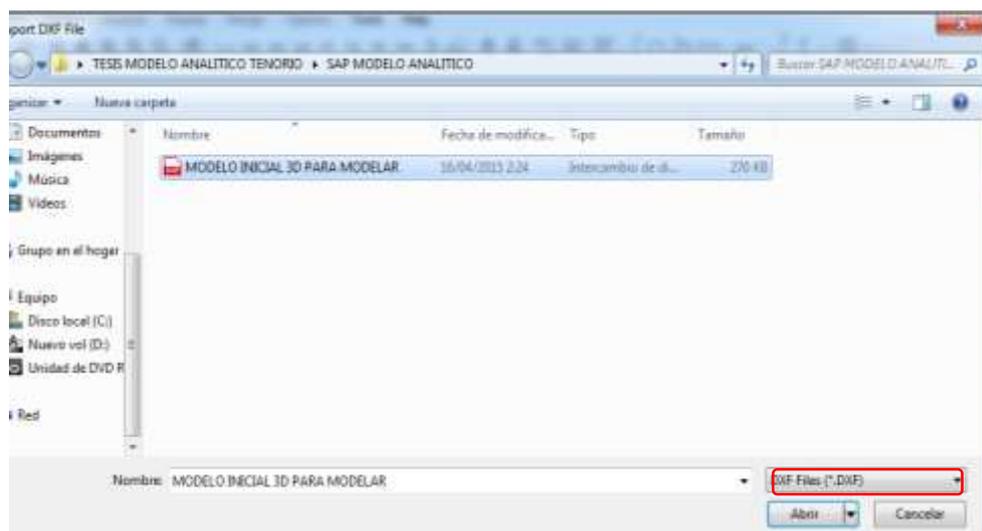
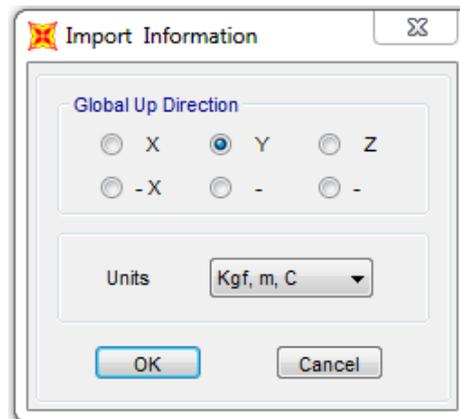


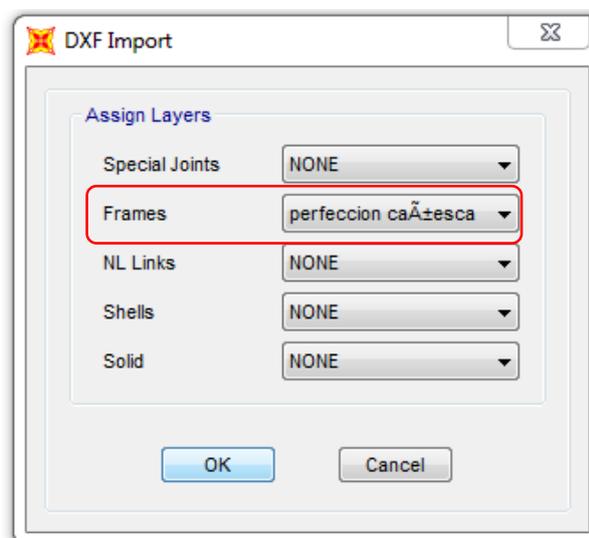
Figura 5.7. Ventana auxiliar de selección archivo para importar SAP2000.

Se importó el dibujo a SAP2000, se debe definir ciertos parámetros previos como la dirección y las unidades, seleccione +Y en “dirección arriba global”, en las unidades de trabajo se define en este caso la opción de kilogramos (Kg), metros (m), y grados centígrados (°C) y di clic en OK.



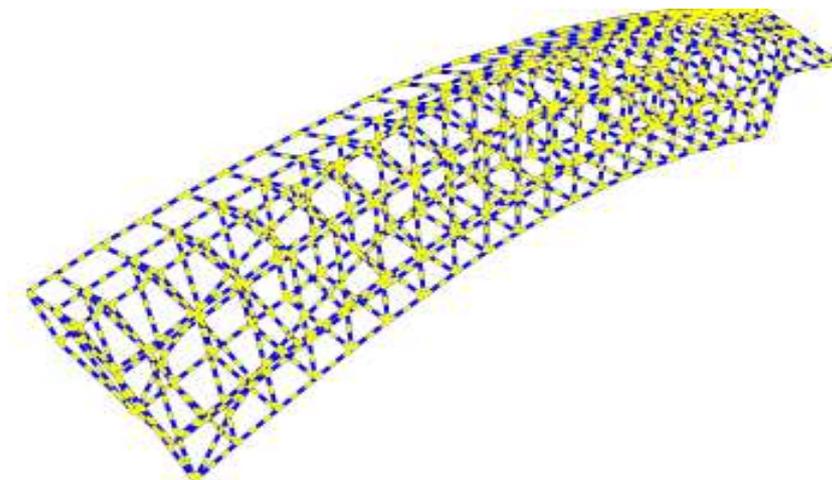
**Figura 5.8.** Ventana “Información Importante” previa importación del modelo a SAP2000.

Luego se seleccionó las capas que se desea importar desde el archivo .dxf seleccionado, en la opción de elementos “Frames” escogí la capa en la cual se realizó el dibujo y finalmente di clic en OK.



**Figura 5.9.** Ventana “Importar DXF” selección de capas a importar a SAP2000.

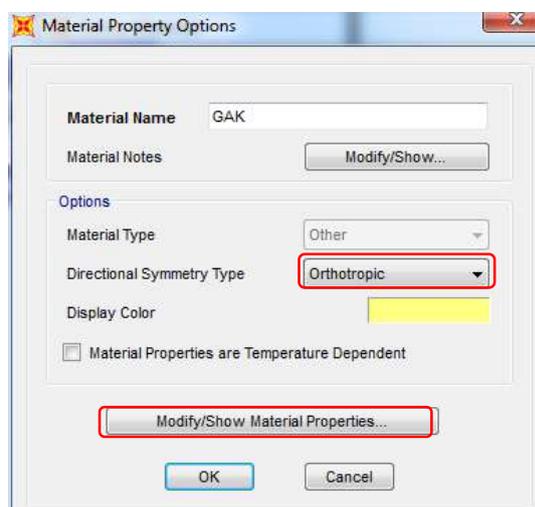
Obtuve el modelo que se visualizó en 3D por defecto, además que todos los elementos aparecen seleccionados para asignar de forma eficiente un material y una sección general.



**Figura 5.10.** Modelo 3D en SAP2000.

### 5.2.3 Definición de materiales.

Se definió los materiales a utilizarse, en el menú Definir (**Define**) en la sección materiales, agregué un “nuevo material”, se desplego una ventana de opciones de propiedades material, se caracterizó el material “**GAK**” que es un material Ortotrópico y dispuse modificaciones en las propiedades mostradas por defecto.



**Figura 5.11.** Ventana “Opciones de propiedades de material” en SAP2000.

Al definir las propiedades del material GAK, establecí propiedades físico-mecánicas algunas de ellas ya anunciadas en el capítulo dos:

**Módulo de Elasticidad promedio (E):** el valor de 9.500 MPa (ver Tabla 2), el valor se debe ingresar en Kg/m<sup>2</sup>, se debe asignar este valor 968700000 Kg/m<sup>2</sup> para los tres ejes de acción E1, E2 y E3.

**Módulo de Poisson (U):** es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal, para el caso característico de la GAK tomé los valores de las direcciones longitudinal, radial y tangencial reportados en la madera 0.40 (Grupo Andino, 1984).

**Coefficiente de dilatación térmica (A):** la GAK al igual que la madera sufre cambios en sus dimensiones con las variaciones de la temperatura, al ser un material ortotrópico posee valores diferentes para las direcciones longitudinal, radial y tangencial, los valores típicos de la madera se adoptan para la GAK es decir, en el eje longitudinal  $3 * 10^{-6}$ , en el tangencial  $2.5 * 10^{-5}$  y en la radial  $1.5 * 10^{-5}$ . (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Corte (G):** esta propiedad relaciona las deformaciones originadas por los esfuerzos de corte o cizalladura con los esfuerzos de la misma naturaleza, existe un valor para cada uno de las direcciones, sin embargo el más común es el longitudinal en sentido de las fibras, para obtener (G) apliqué la siguiente expresión (Grupo Andino, 1984).

$$G = \frac{E}{25} \quad (51)$$

Donde:

G, es módulo de corte en Kg/m<sup>2</sup>.

E, es el módulo de elasticidad en Kg/m<sup>2</sup>.

Aplicando (51):

$$G = \frac{968700000}{25} = 38748000 \frac{Kg}{m^2}$$

**Peso por unidad de Volumen:** esta es la relación que existe entre el peso de una sustancia y el volumen de la misma, también se simplifica como el producto de la masa por unidad de volumen por la aceleración de la gravedad en este caso será  $800 \text{ Kg/m}^3$  (NSR-10 R. C., 2010).

**Masa por unidad de Volumen:** Es una magnitud física escalar, referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia u objeto en este caso será  $81.55 \text{ Kg/m}^3$  (NSR-10 R. C., 2010).

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for material 'GAK'. The dialog is organized into several sections:

- Material Name:** GAK
- Material Type:** Other
- Symmetry Type:** Orthotropic
- Modulus of Elasticity:** E1, E2, E3 are all set to 9.687E+08.
- Poisson:** U12, U13, U23 are all set to 0.4.
- Coeff of Thermal Expansion:** A1 is 3.000E-06, A2 is 2.500E-05, and A3 is 1.500E-05.
- Shear Modulus:** G12, G13, G23 are all set to 38747600.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume is 800, and Mass per Unit Volume is 81.55.
- Units:** Kg, m, C
- Advanced Material Property Data:** Includes buttons for Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties..., and Thermal Properties...

**Figura 5.12.** Datos de propiedades del material GAK en SAP2000.

Aún resta por definir 2 materiales para las secciones tipo Área (Shell), el primero será la cubierta de material vegetal de “CADE”, se realiza el mismo proceso excepto que este material será isotrópico.

**Peso por unidad de Volumen:** en este para el Cade será  $500 \text{ Kg/m}^3$  (Grupo Andino, 1984).

**Masa por unidad de Volumen:** Es una magnitud física escalar, referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia u objeto en este caso será  $50.98 \text{ Kg/m}^3$  (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Elasticidad promedio (E):** para la Cade el valor será de 10000000  $\text{Kg/m}^2$  (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Poisson (U):** es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal, para el caso de la Cade es 0.30 (Grupo Andino, 1984).

**Coefficiente de dilatación térmica (A):** en el caso de la Cade es  $1.17 * 10^{-5}$ . (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Corte (G):** el módulo de corte se calcula automáticamente y en este caso es de 3846154  $\text{Kg/m}^2$  (Grupo Andino, 1984).

**Figura 5.13.** Datos de propiedades del material CADE en SAP2000.

El siguiente material para los elementos tipo Área (Shell), el tablero peatonal de “DUELA”, se reitera el mismo proceso anterior.

**Peso por unidad de Volumen:** en este para el Duela será  $600 \text{ Kg}/\text{m}^3$  (Grupo Andino, 1984).

**Masa por unidad de Volumen:** Es una magnitud física escalar, referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia u objeto en este caso será  $61.18 \text{ Kg}/\text{m}^3$  (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Elasticidad promedio (E):** para la Duela el valor será de 917500000  $\text{Kg}/\text{m}^2$  (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Poisson (U):** es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal, para el caso de la Duela es 0.30 (Grupo Andino, 1984).

**Coefficiente de dilatación térmica (A):** en el caso de la Duela es  $1.17 * 10^{-5}$ . (Grupo Andino, 1984).

**Módulo de Corte (G):** el módulo de corte se calcula automáticamente y en este caso es de 352900000 Kg/m<sup>2</sup> (Grupo Andino, 1984).

Material Property Data	
<b>General Data</b>	
Material Name and Display Color	DUELA
Material Type	Other
Material Notes	Modify/Show Notes...
<b>Weight and Mass</b>	
Weight per Unit Volume	600.
Mass per Unit Volume	61.183
<b>Units</b>	
	Kgf, m, C
<b>Isotropic Property Data</b>	
Modulus of Elasticity, E	9.175E+08
Poisson	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	3.529E+08
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

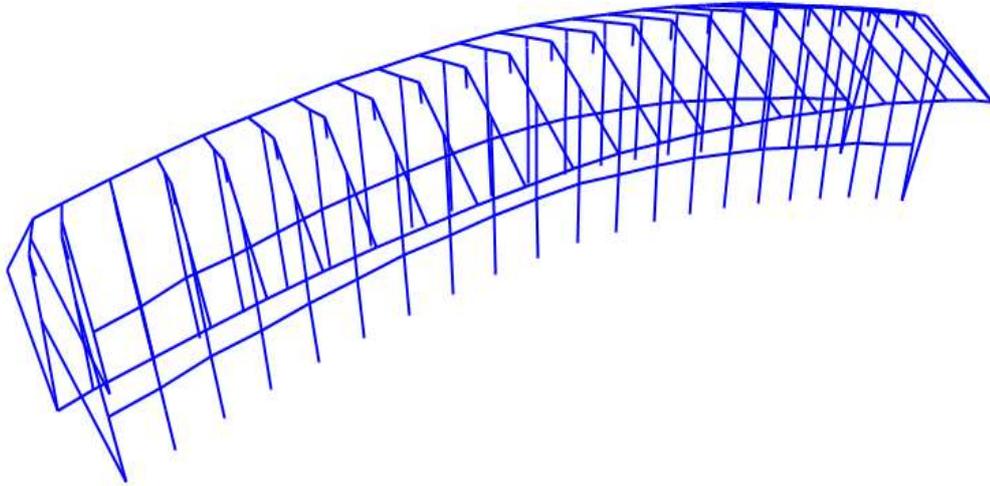
**Figura 5.14.** Datos de propiedades del material DUELA en SAP2000.

## 5.2.4 Definición y asignación de secciones.

### 5.2.4.1 Elementos simples.

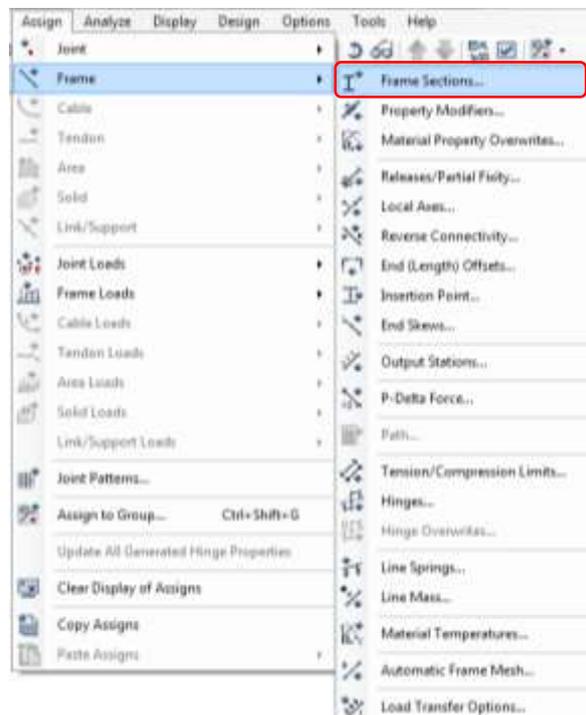
El siguiente paso se creó las secciones específicas para cada elemento **Frame** de la estructura, en el caso particular de los elementos simples, es decir formados por un solo culmo de GAK se siguió este procedimiento.

Se seleccionó todos los elementos simples, básicamente los elementos verticales o que trabajen como columnas, además de los elementos inclinados que conforman la cubierta del puente y elementos de conexión simple.



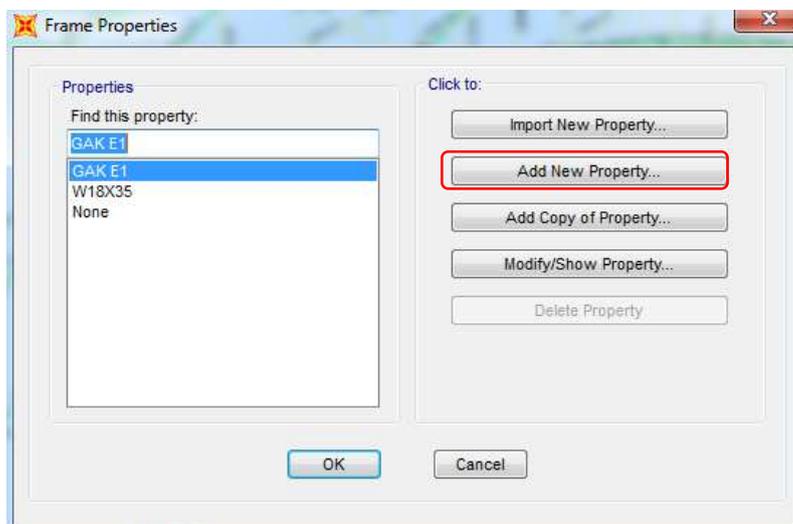
**Figura 5.15.** Selección de elementos simples en SAP2000.

En el menú Asignar (**Assign**), submenú elementos barra (**Frame**) y seleccioné la opción secciones de barra (**Frame sections**).



**Figura 5.16.** Asignación de tipo de elemento Frame en SAP2000.

Se desplego una ventana auxiliar “Propiedades de la sección”, con secciones propias del programa, añadí una nueva propiedad de sección.



**Figura 5.17.** Ventana Selección nueva propiedad de sección en SAP2000.

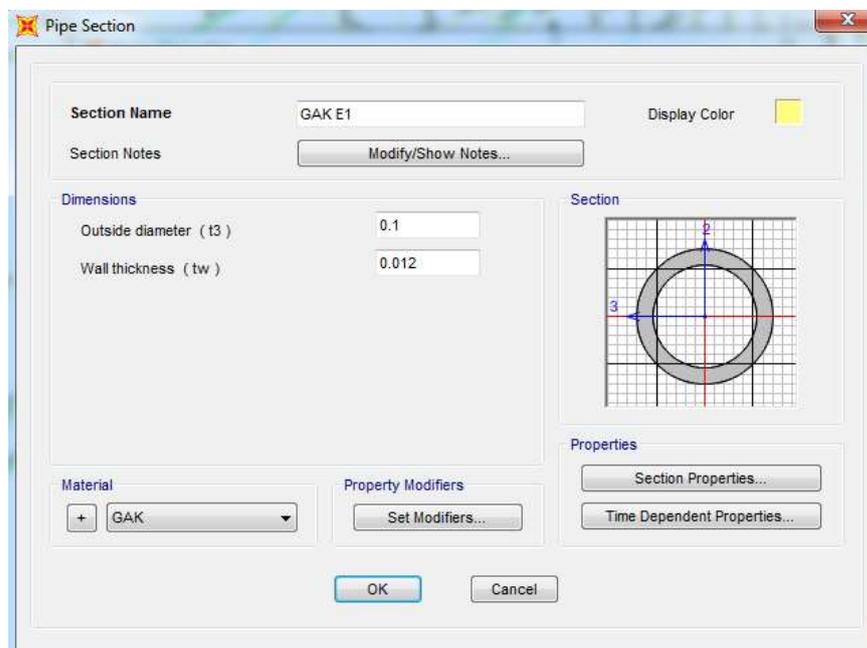
Por defecto se cargaron secciones de acero, seleccione la opción tubo (**Pipe**).



**Figura 5.18** Opciones de tipo de sección para acero en SAP2000.

Se asignó el nombre de la sección GAK E1, propones las dimensiones de la sección, el material de la sección será la GAK que fue definido previamente.

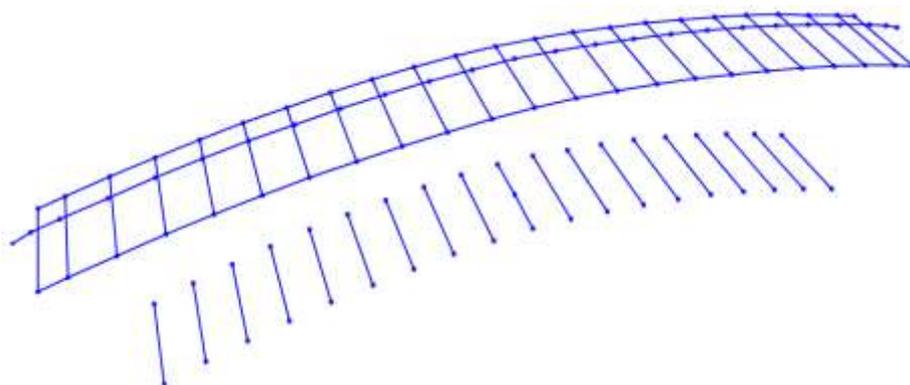
Las dimensiones según los culmos encontrados en el puente de GAK son, **Diámetro externo** 10 cm o 0.10 m y **Espesor** 1.2 cm o 0.012 m.



**Figura 5.19.** Definición de la sección tipo tubo de acero SAP2000.

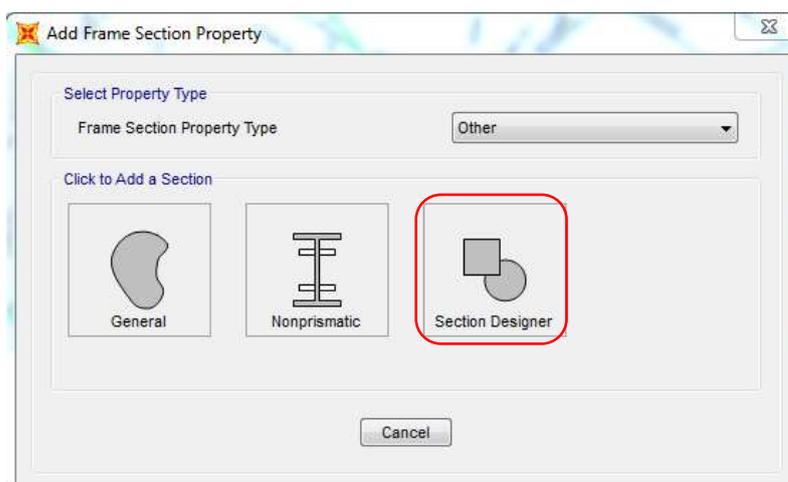
#### 5.2.4.2 Elementos compuestos.

**Elementos compuestos por dos (2) culmos de GAK:** se seleccionó todos los elementos que posean esta sección, todos los elementos transversales de la cubierta del puente así como los que sostiene el tablero de la estructura, a los mencionados añadí las vigas longitudinales de la cubierta la viga de la cumbrera y las dos de apoyo sobre las columnas del marco.



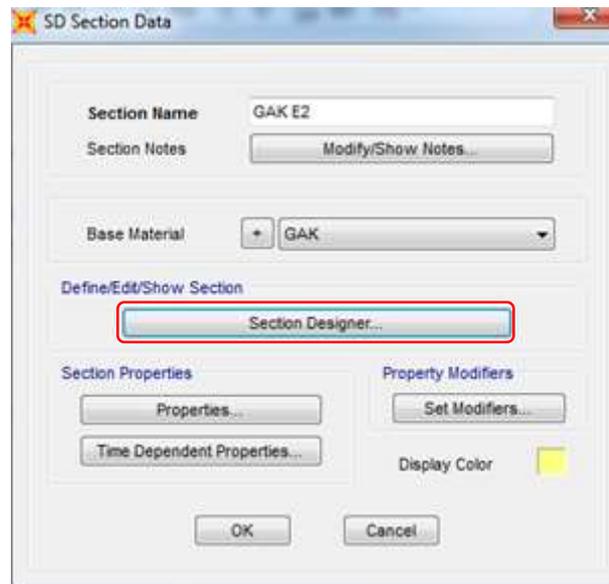
**Figura 5.20.** Selección de elementos conformados por dos culmos de GAK en SAP2000.

Se reiteró el proceso de añadir un nuevo material pero en esta ocasión seleccione Otro (**Other**) en vez del acero que se muestran por defecto, y a su vez la opción diseñador de sección (**Section Designer**).



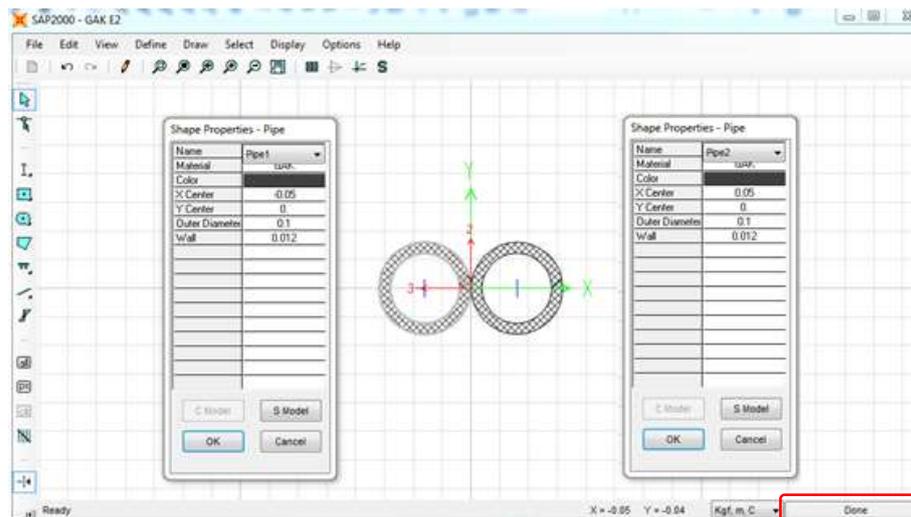
**Figura 5.21.** Diseñador de sección en SAP2000.

Se asignó el nombre de la sección GAK E2, el material de la sección será la GAK que fue definido previamente y di clic en diseñar sección (**Section Designer**).



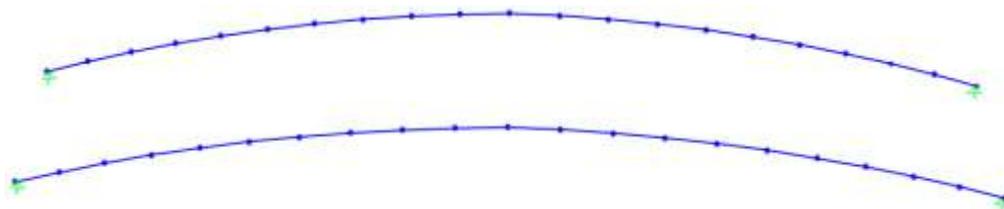
**Figura 5.22.** Datos de sección “GAK E2” en SAP2000.

En la ventana auxiliar “GAK E2” se generó la sección compuesta de dos culmos de GAK, seleccione elementos tubo (**Pipe**) con marial base GAK, diámetro externo 0.10 m y espesor 0.012 m, las coordenadas del centro del primer tubo es X:-0.05; Y: 0, las del segundo tubo son X:+0.05; Y: 0, finalmente se presiona el botón Hecho (**Done**).



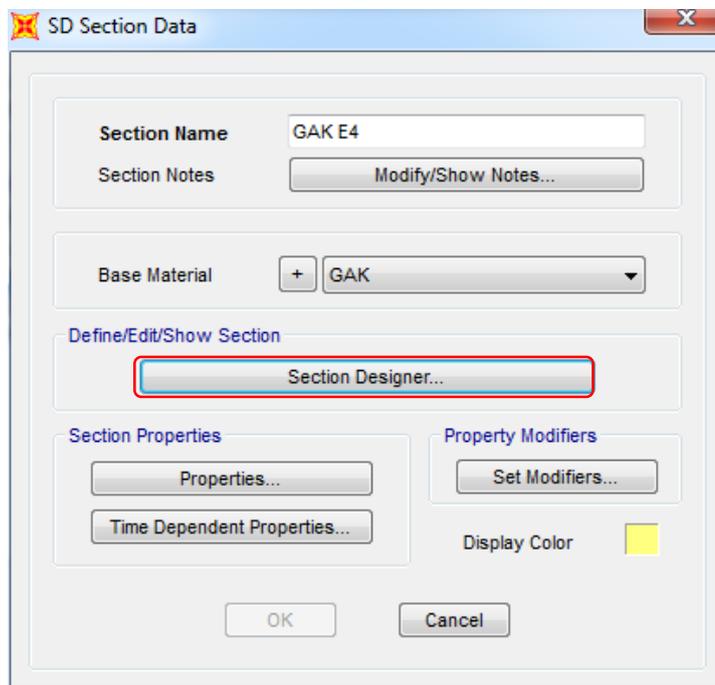
**Figura 5.23.** Ventana “GAK E2” definición de material y dimensiones en SAP2000.

**Elementos compuestos por cuatro (4) culmos de GAK:** se repitió el proceso anterior hasta el punto en que hay que diseñar la sección, los elementos seleccionados son las vigas principales longitudinales que sostienen el tablero peatonal de circulación.



**Figura 5.24.** Selección de elementos conformados por cuatro culmos de GAK en SAP2000.

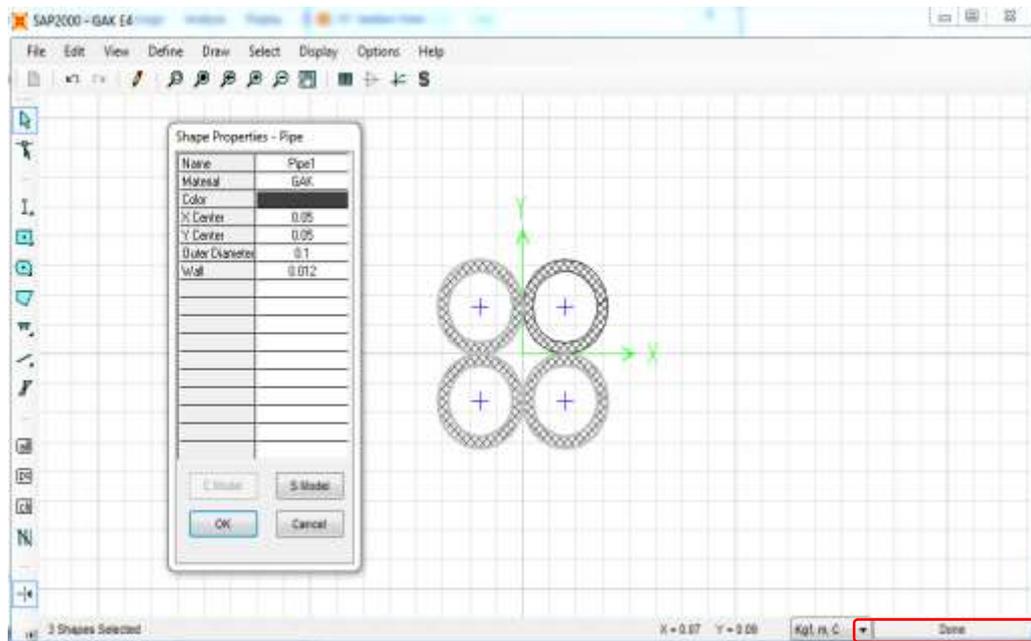
Se asignó el nombre de la sección GAK E4, el material de la sección será la GAK que fue definido previamente y di clic en diseñar sección (**Section Designer**).



**Figura 5.25.** Datos de sección “GAK E4” en SAP2000.

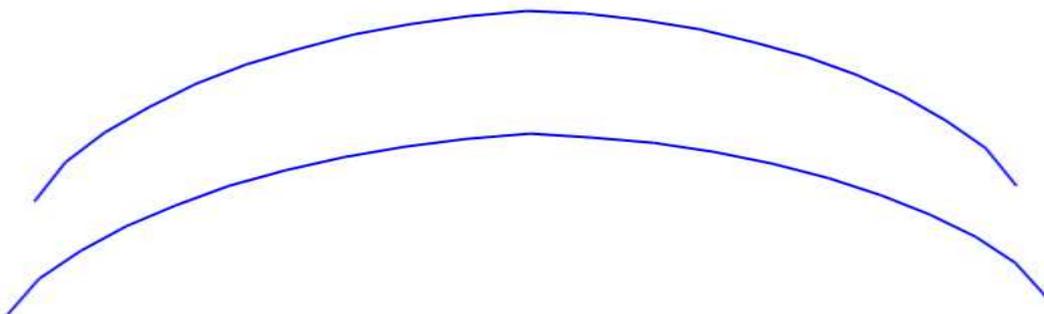
En la ventana auxiliar “GAK E4” se generó la sección compuesta de cuatro culmos de GAK, seleccione elementos tubo (**Pipe**) con marial base GAK, diámetro externo

0.10 m y espesor 0.012 m, las coordenadas del centro del primer tubo es  $X:-0.05$ ;  $Y:+0.05$ , las del segundo tubo son  $X:+0.05$ ;  $Y:+0.05$ , del tercer tubo son  $X:-0.05$ ;  $Y:-0.05$ , y del cuarto tubo son  $X:+0.05$ ;  $Y:-0.05$ , y finalmente se presiona Hecho (**Done**).



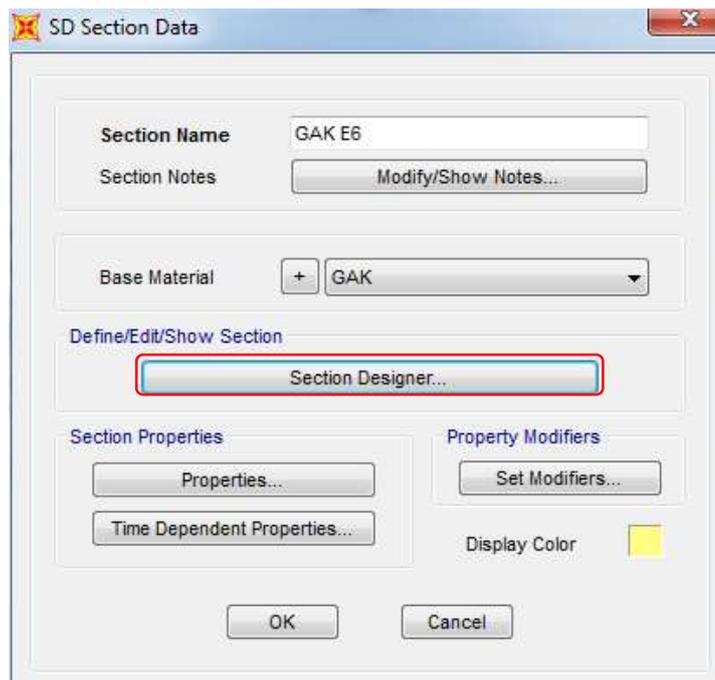
**Figura 5.26.** Ventana “GAK E4” definición de material y dimensiones en SAP2000.

**Elementos compuestos por seis (6) culmos de GAK:** se siguió los mismos pasos hasta el punto en que hay que diseñar la sección, los elementos seleccionados son las vigas principales “cargadoras” en forma de arco, las mismas que trabajan a flexión y son los elementos que soportan la mayor parte de la carga y distribuyen los esfuerzos hacia los apoyos.



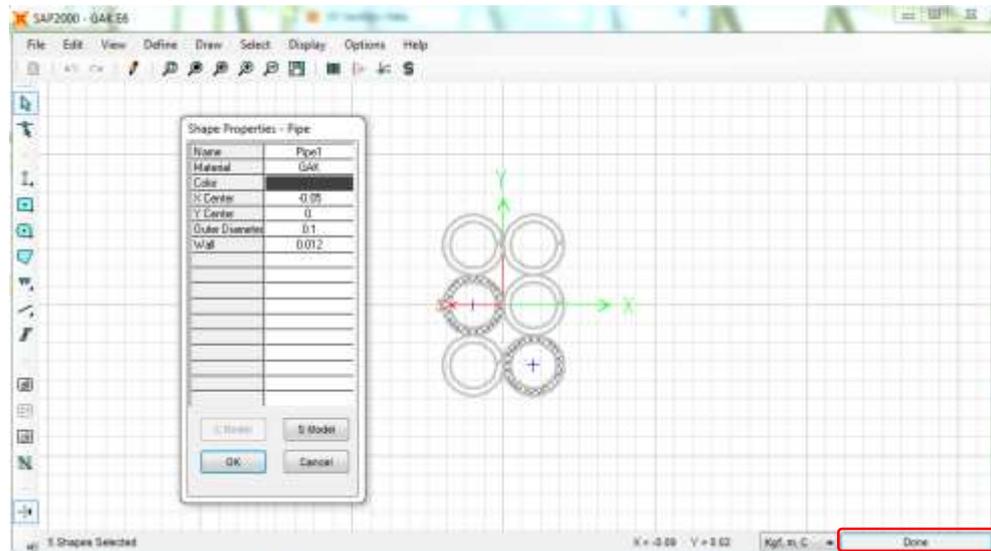
**Figura 5.27.** Selección de elementos conformados por seis culmos de GAK en SAP2000.

Se asignó el nombre de la sección GAK E6, el material de la sección será la GAK que fue definido previamente y di clic en diseñar sección (**Section Designer**).



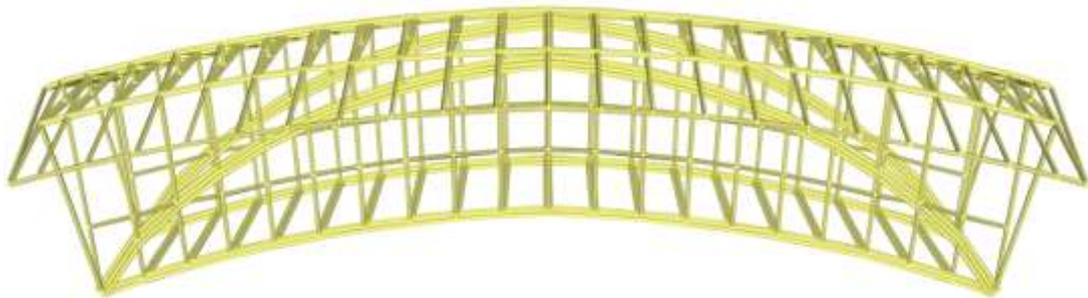
**Figura 5.28.** Datos de sección “GAK E6” en SAP2000.

En la ventana auxiliar “GAK E6” se generó la sección compuesta de cuatro culmos de GAK, seleccione elementos tubo (**Pipe**) con marial base GAK, diámetro externo 0.10 m y espesor 0.012 m, las coordenadas del centro del primer tubo es X:-0.05; Y:+0.10, las del segundo tubo son X:-0.05; Y:+0.00, del tercer tubo son X:-0.05; Y:-0.10, del cuarto tubo son X:+0.05; Y:+0.10, del quinto tubo son X:+0.05; Y:+0.00, del sexto tubo son X:+0.05; Y:-0.10, y finalmente presione Hecho (**Done**).



**Figura 5.29.** Ventana “GAK E6” definición de material y dimensiones en SAP2000.

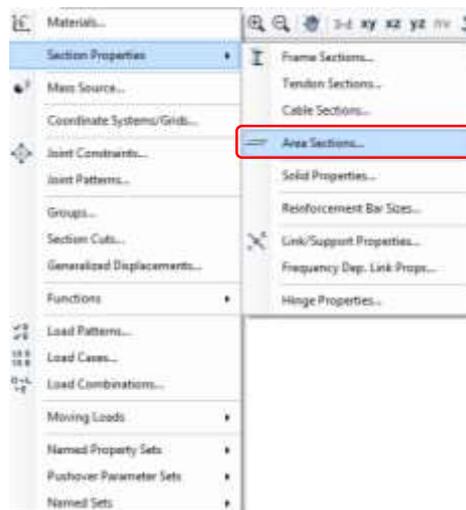
Se pudo visualizar la magnitud de las secciones asignadas en la vista extruida en las opciones para mostrar (**Display**).



**Figura 5.30.** Vista extruida de los elementos de GAK en SAP2000.

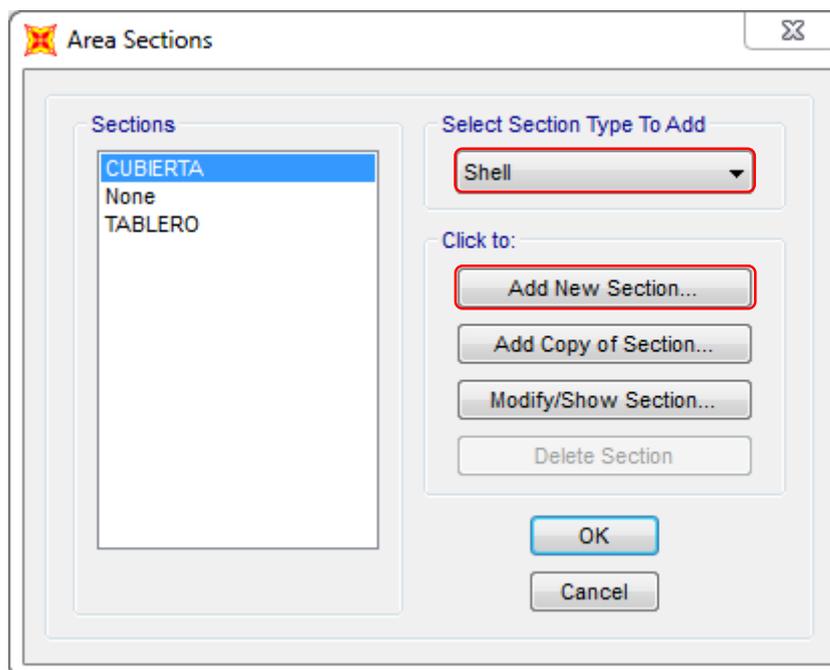
#### 5.2.4.3 Elementos tipo Área (Shell).

**Elementos área de cubierta:** se definió la sección de Área, en el menú definir a su vez el submenú propiedades de sección, escogí la opción secciones de área.



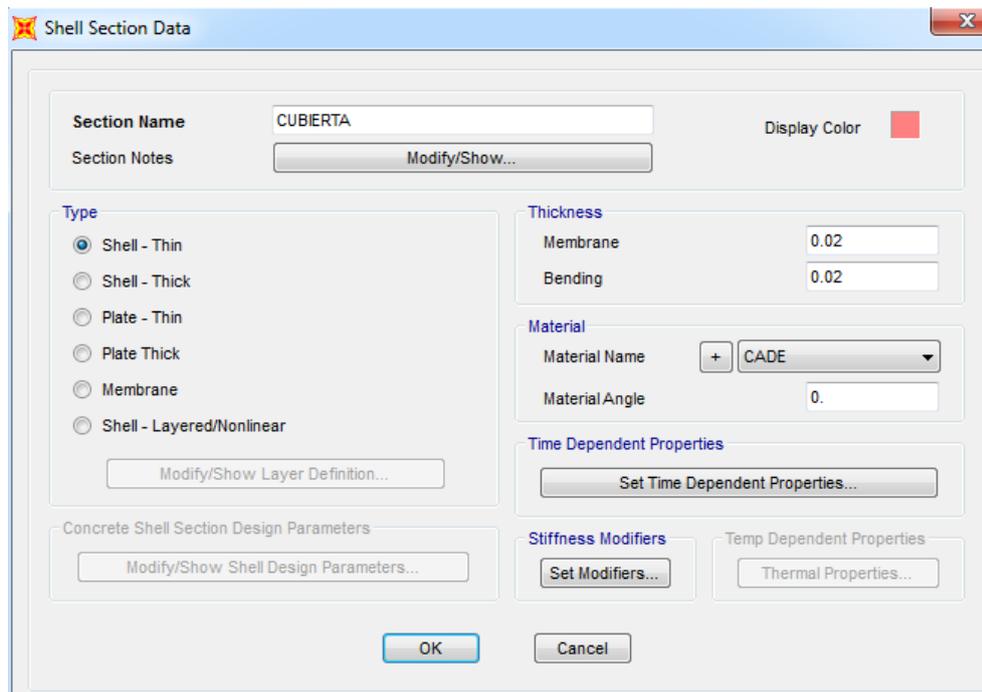
**Figura 5.31.** Definición de propiedades de elementos áreas.

Se seleccionó el tipo de sección Shell y se añadió una nueva sección.



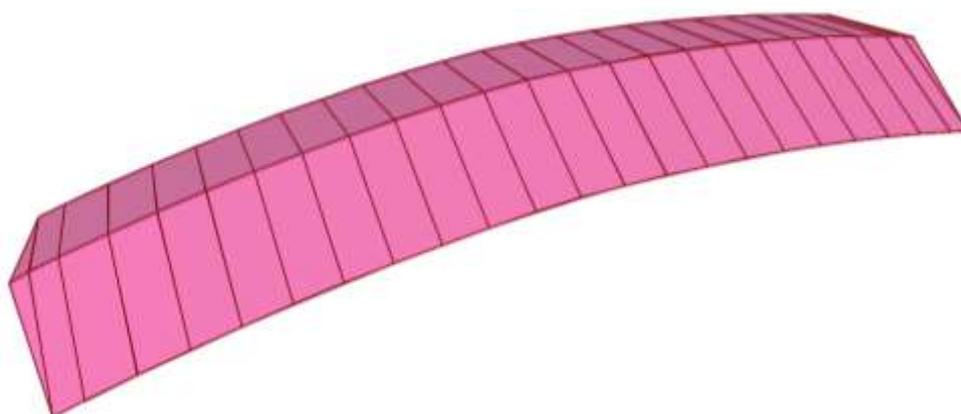
**Figura 5.32.** Ventana secciones de Área en SAP2000.

Se definió el nombre de la sección como CUBIERTA, y el tipo será Shell – Thin es decir cubierta delgada, respecto al espesor definí una membrana de 0.02 m y un doblamiento de 0.02 m, y asigne el material CADE definido con anterioridad.



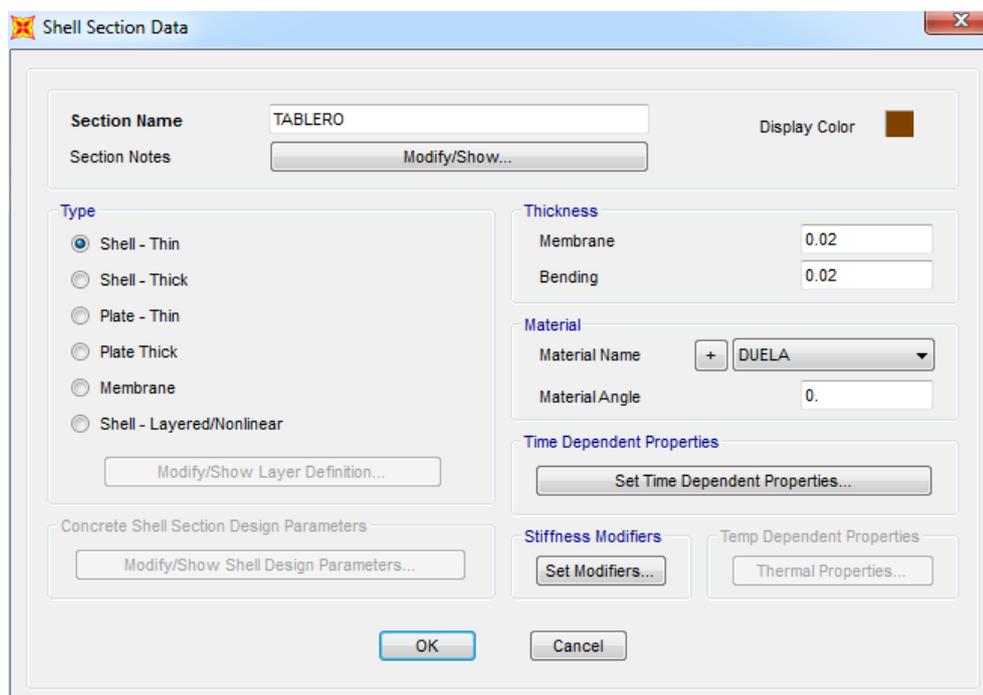
**Figura 5.33.** Datos de la sección de “CUBIERTA” en SAP2000.

Con el comando Dibujar poli área (**Draw Poly Area**) , se seleccionó los puntos (**joints**) para crear un área entre estos puntos de la cubierta.



**Figura 5.34.** Elementos Shell de la Cubierta en SAP2000.

**Elementos área de tablero:** de la misma forma se añadió una nueva sección de área para el tablero peatonal, tipo Shell – Thin, el espesor de la membrana es de 0.02 m y el doblamiento fue igual de 0.02 m, y se estableció el material DUELA definido anteriormente.



**Figura 5.35.** Datos de la sección “TABLERO” en SAP2000.

144 *Figura 5.35. Datos de la sección “TABLERO” en SAP2000.*

Con el comando Dibujar poli área (**Draw Poly Area**) , se seleccionó los puntos (**joints**) para crear un área entre estos puntos del tablero.



**Figura 5.36.** Elementos Shell del tablero en SAP2000.

### 5.2.5 Asignación de apoyos.

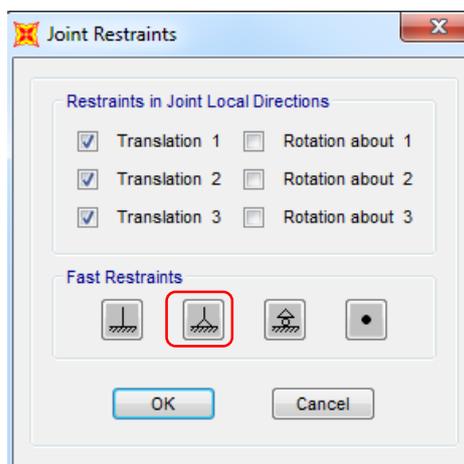
Se seleccionó los puntos donde existirán las restricciones de movimiento, en este caso serán los 4 puntos que se encuentran en contacto directo con la cimentación, el tipo de restricción fue de desplazamiento vertical y horizontal, es decir un apoyo fijo.

Desde el menú Asignar (**Assign**), submenú junta (**Joint**), opción restricciones (**Restraints**), se abrirá una ventana para definir las restricciones de la junta seleccionada.



**Figura 5.37.** Asignar restricciones en juntas en SAP2000.

En la ventana restricciones de junta, escogí una restricción rápida de apoyo fijo.



**Figura 5.38.** Ventana de restricción de juntas en SAP2000.

## 5.2.6 Definición de tipos de carga.

Se reiteró el objetivo del modelo analítico, es emular lo sucedido en el campo durante los ensayos experimentales, los tipos de carga actuantes sobre la estructura en

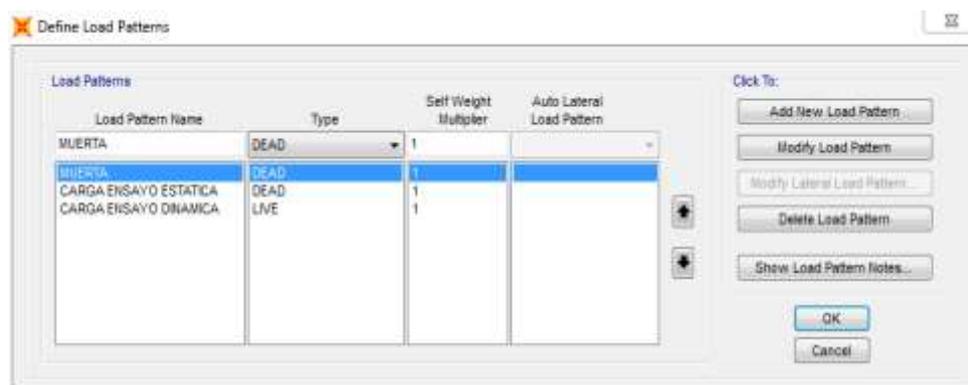
ese determinado lapso de tiempo fue el peso propio de la estructura generalizada como carga muerta, la carga estática de 700 kg, y la carga dinámica de 300 kg.

Hice clic en el menú definir (**Define**), opción tipos de carga (**Load patterns**), se desplegó una ventana auxiliar para definir los tipos de carga y su factor multiplicador.



**Figura 5.39.** Asignar tipos de carga en SAP2000.

Se añadió los 3 tipos de carga a utilizar que son **MUERTA**, **CARGA ENSAYO ESTÁTICA**, **CARGA ENSAYO DINÁMICA**, los tipos son DEAD, DEAD y LIVE respectivamente, y el factor de multiplicación del peso propio será de uno (1).

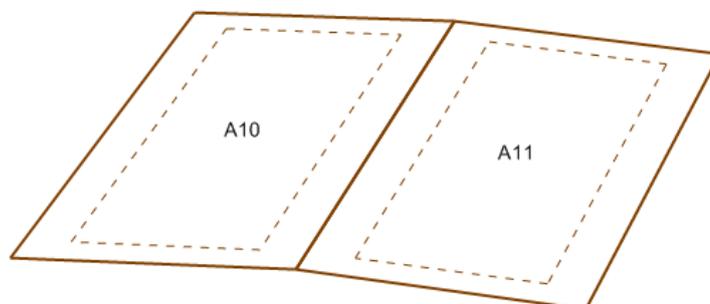


**Figura 5.40.** Ventana “definición tipos de cargas” en SAP2000.

### 5.2.7 Asignación de carga estática.

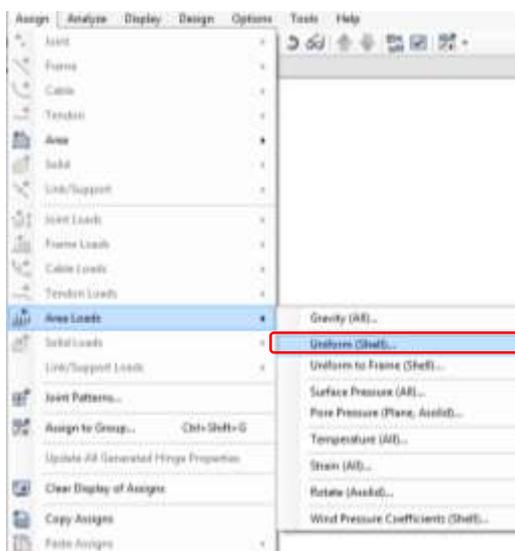
Se asignó una carga de 700 kg, en medio de la luz del puente peatonal de GAK tal como se realizó en los ensayos experimentales, para representar la carga en nuestro modelo analítico se asignara una carga de área (**Area Loads**), ya que representa de mejor manera la aplicación de los 14 saquillos sobre el puente, que una carga puntual simple.

Se marcó las áreas donde se aplicó la carga de área, las dos consecuentes al centro de la luz del puente, las etiquetas asignadas en SAP2000 son A10 y A11 en total  $5.0 m^2$ .



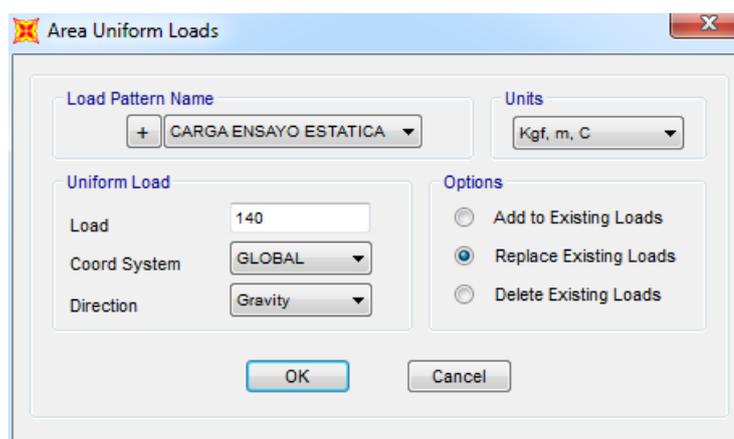
**Figura 5.41.** Áreas (A10 y A11) donde se asignaran cargas distribuidas en SAP2000.

En el menú asignar (**Assign**), submenú cargas de área (**Area Loads**), opción uniforme (**Uniform**) y se generó una ventana emergente para definir la magnitud y dirección.



**Figura 5.42.** Asignar cargas de área distribuidas uniformemente en SAP2000.

En la ventana “Cargas uniformes de área” (**Area Uniform Loads**), se designó el tipo de carga que en este caso es “CARGA ENSAYO ESTÁTICA”, por ser el área asignada igual a 5.0 m<sup>2</sup> la carga de área 140 kg/m<sup>2</sup> representa los 700 kg que se aplicó en el ensayo de carga estática, la dirección de la carga será la misma de la gravedad.

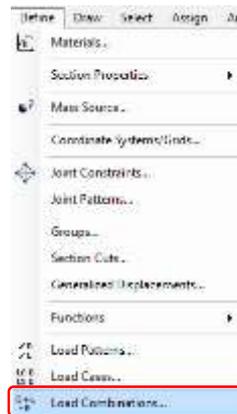


**Figura 5.43.** Ventana “Cargas uniformes de área” en SAP2000.

### 5.2.8 Resultados de aplicación de carga muerta y carga ensayo estática.

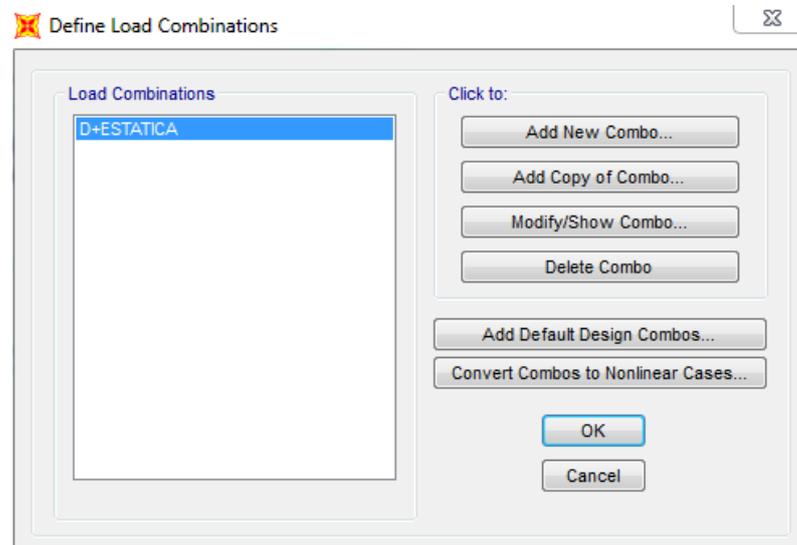
Se asignó la combinación de cargas a la que fue sometida la estructura durante el ensayo experimental de carga estática es decir Carga Muerta y Carga Ensayo Estática.

Se definió la combinación de cargas, en el menú Definir (**Define**), opción combinaciones de carga (**Load Combinations**).



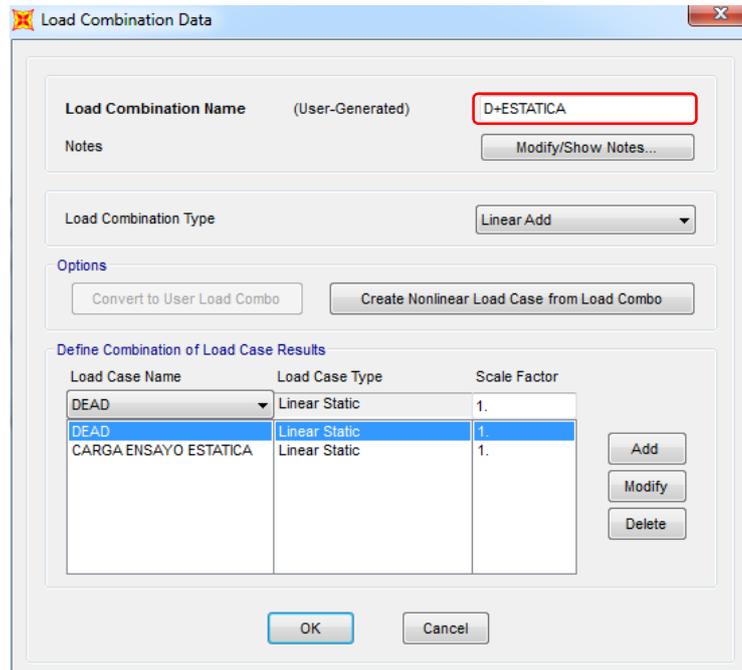
**Figura 5.44.** Definición de combinaciones de carga en SAP2000.

Se añadió una nueva combinación de cargas en la opción **(Add New Combo)**.



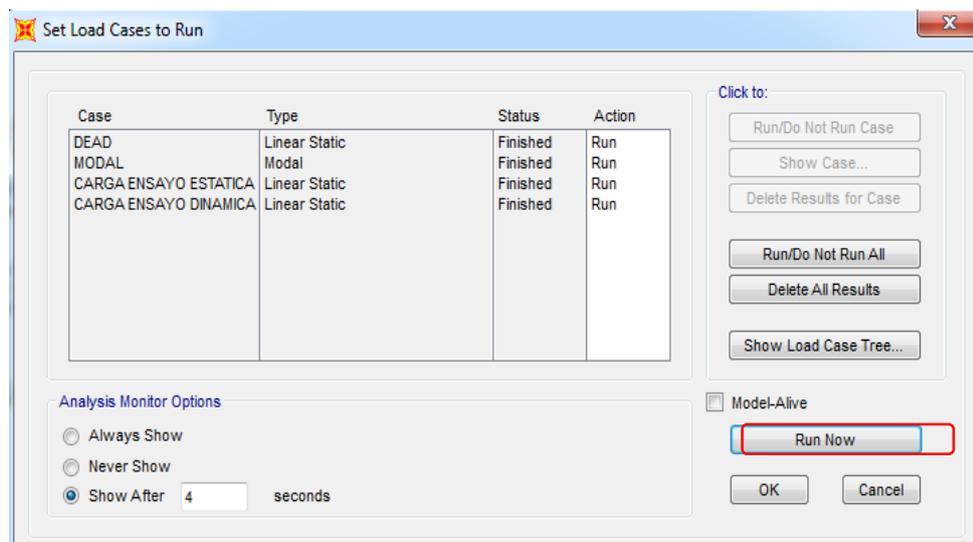
**Figura 5.45.** Ventana auxiliar “Definir combinaciones de carga” en SAP2000.

Se definió los datos de la combinación de cargas, nombré la combinación “D+ESTATICA”, y se seleccionó los tipos de carga que la componen, así como el factor de escala, la forma de interactuar de los tipos de carga fue una sumatoria lineal.



**Figura 5.46.** Ventana auxiliar “Datos de combinación de carga” en SAP2000.

Se corrió el análisis de la estructura en el botón “Reproducir” , se mostró una ventana auxiliar para programar los casos de carga que se consideraran en el análisis y se hace clic en “Run Now”.



**Figura 5.47.** Ventana “Programación de casos de carga” para el análisis en SAP2000.

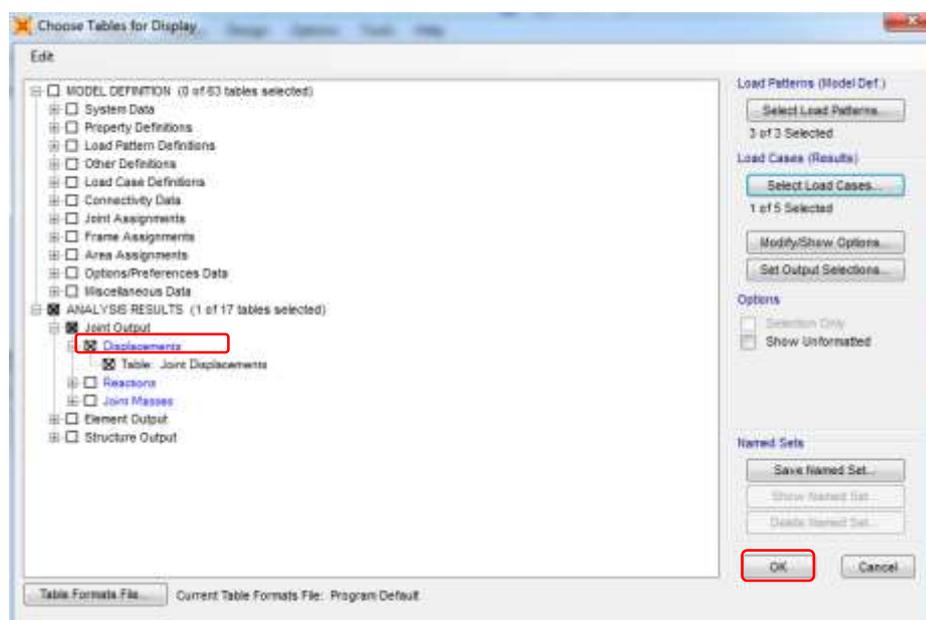
Se analizó las deflexiones que ocurrieron sobre la estructura al aplicar la carga estática y la carga muerta, en los puntos de interés definidos en el ensayo de carga estática P1-P7 en el tablero peatonal y P10-P30 en el pasamano del puente.

Se visualizó los desplazamientos en el menú mostrar (**Display**), opción mostrar tablas (**Show Tables**)



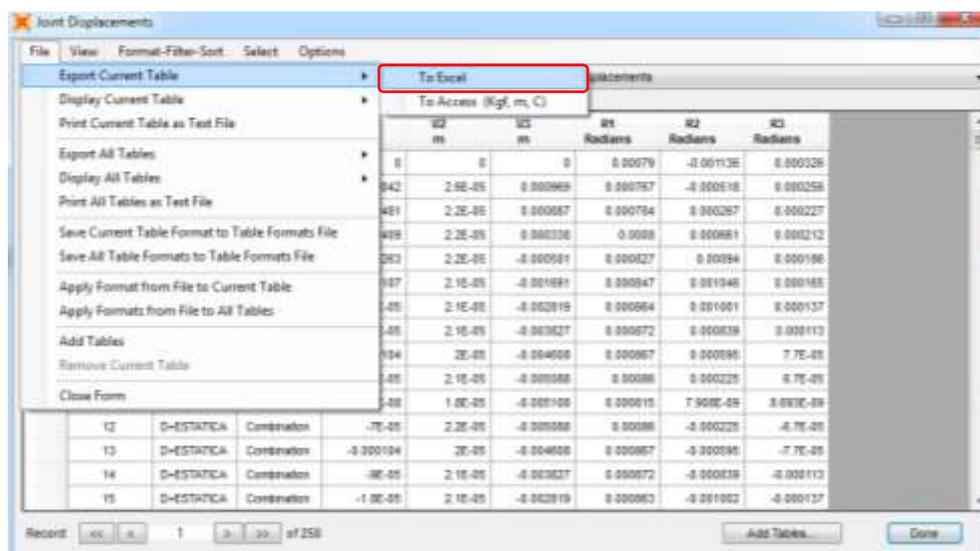
**Figura 5.48.** Opción mostrar resultados en tablas en SAP2000.

Se seleccionó las tablas, Resultados de análisis (**ANALYSIS RESULTS**), resultados de juntas (**Joint Output**), desplazamientos (**Displacements**), tabla: desplazamientos en juntas (**Table: Joint Displacements**) y di clic en el botón OK.



**Figura 5.49.** Ventana “Escoger tablas a mostrar” en SAP2000.

Se exporto los resultados en tabla a formato Excel, en el menú archivo, submenú exportar tabla actual (**Export Current Table**), opción a Excel (**To Excel**).



**Figura 5.50.** Ventana “Desplazamientos en juntas” opción exportar a Excel en SAP2000.

Se clasificó y ordenó los resultados en Excel, de forma que se puedan comparar con las tablas obtenidas en los ensayos experimentales

**Tabla 22.**

Deflexiones analíticas en los puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	COMBINACION DE CARGA	DESPLAZAMIENTO Z	DESPLAZAMIENTO Z
		m	mm
P1	D+ESTATICA	-0.000581	-0.581
P2	D+ESTATICA	-0.00282	-2.82
P3	D+ESTATICA	-0.004608	-4.608
P4	D+ESTATICA	-0.005108	-5.108
P5	D+ESTATICA	-0.004608	-4.608
P6	D+ESTATICA	-0.002819	-2.819
P7	D+ESTATICA	-0.000581	-0.581

**Tabla 23.**

Deflexiones analíticas en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

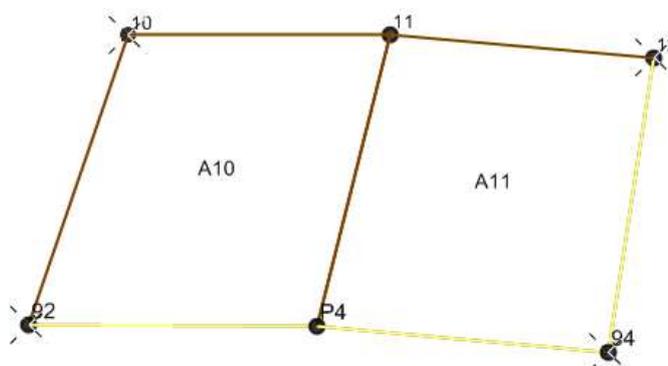
PUNTO	COMBINACION DE CARGA	DESPLAZAMIENTO Z	DESPLAZAMIENTO Z
		m	mm
P10	D+ESTATICA	-0.000028	-0.028
P11	D+ESTATICA	0.000951	0.951
P12	D+ESTATICA	0.000861	0.861
P13	D+ESTATICA	0.000329	0.329
P14	D+ESTATICA	-0.000593	-0.593
P15	D+ESTATICA	-0.001702	-1.702
P16	D+ESTATICA	-0.00283	-2.83
P17	D+ESTATICA	-0.003837	-3.837
P18	D+ESTATICA	-0.004614	-4.614
P19	D+ESTATICA	-0.005072	-5.072
P20	D+ESTATICA	-0.00509	-5.09
P21	D+ESTATICA	-0.005072	-5.072
P22	D+ESTATICA	-0.004614	-4.614
P23	D+ESTATICA	-0.003837	-3.837
P24	D+ESTATICA	-0.002829	-2.829
P25	D+ESTATICA	-0.001701	-1.701
P26	D+ESTATICA	-0.000592	-0.592
P27	D+ESTATICA	0.00033	0.33
P28	D+ESTATICA	0.000861	0.861
P29	D+ESTATICA	0.000951	0.951
P30	D+ESTATICA	-0.000028	-0.028

### 5.2.9 Asignación de carga dinámica.

Cuando se aplicó las cargas dinámicas en el ensayo experimental, fue la transmisión de cargas y aceleración de cuatro personas saltando oscilatoriamente sobre la estructura,

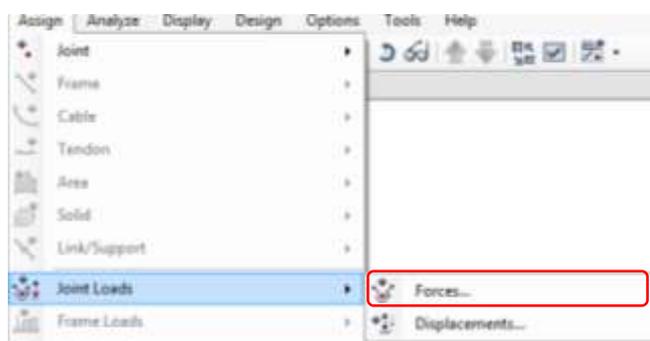
En el modelo analítico se asemejo al ensayo, modelando las personas como cargas aplicadas en la estructura en los cuatro puntos donde se ubicaron las personas, de la misma forma se definió la velocidad a la que las “cargas” oscilaron durante el período del ensayo.

Se seleccionaron las juntas donde se aplicó las masas, los vértices cuatro de las áreas A10 y A11 que se seleccionaron en la aplicación de la carga estática.



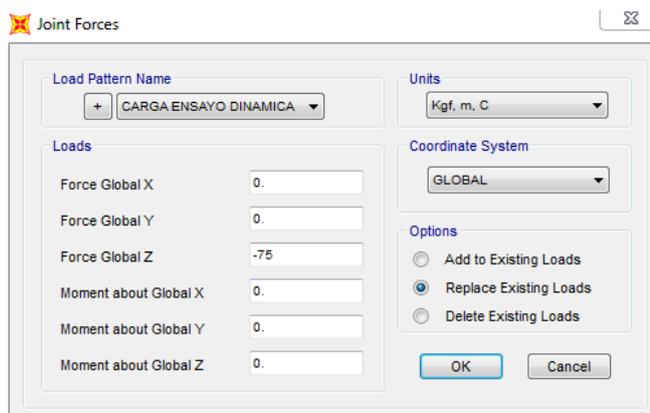
**Figura 5.51.** Juntas donde se aplicó masas en SAP2000.

En el menú asignar (**Assign**), submenú cargas junta (**Joint Loads**), opción fuerzas (**Forces**) y se generó una ventana emergente para definir la magnitud y dirección.



**Figura 5.52.** Opción masas en juntas en SAP2000.

En la ventana “Fuerzas de junta”, escogí el tipo de carga definido previamente “CARGA ENSAYO DINÁMICA” se definió una magnitud de 75 kg de carga, además del sentido y eje.

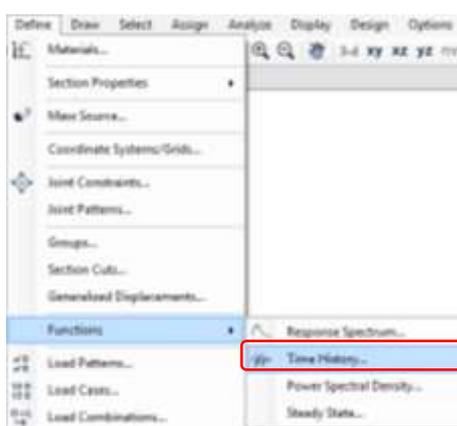


**Figura 5.53.** Ventana auxiliar “Fuerzas de Junta” en SAP2000.

### 5.2.10 Asignación de funciones periódicas para cargas dinámicas.

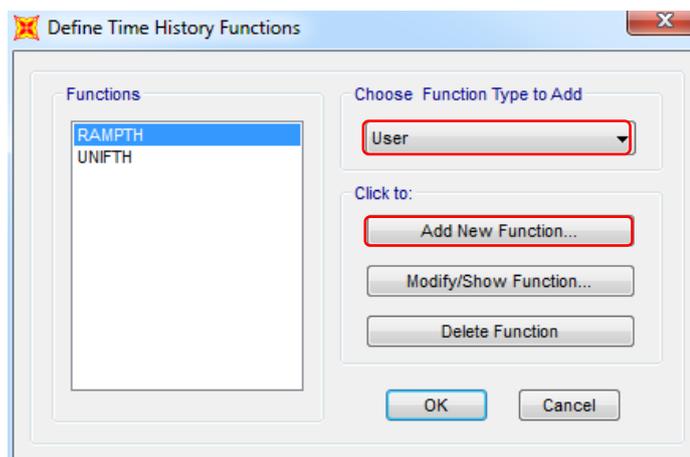
Para asemejar el movimiento oscilatorio de esta carga dinámica se procedió a definir una función periódica, la función periódica que representa el comportamiento de los cuerpos que producen la vibración.

En el menú definir (**Define**), submenú funciones (**Functions**), opción historial del tiempo (**Time History**), se mostró la ventana emergente para definir las funciones de historia en el tiempo.



**Figura 5.54.** Opción historia en el tiempo en SAP2000.

En la ventana “Definir funciones de historia en el tiempo”, en el menú añadir tipo de función, escogí la opción usuario (**User**), y di clic en el botón añadir nueva función (**Add New Function**).



**Figura 5.55.** Ventana “Definir funciones de historia en el tiempo” en SAP2000.

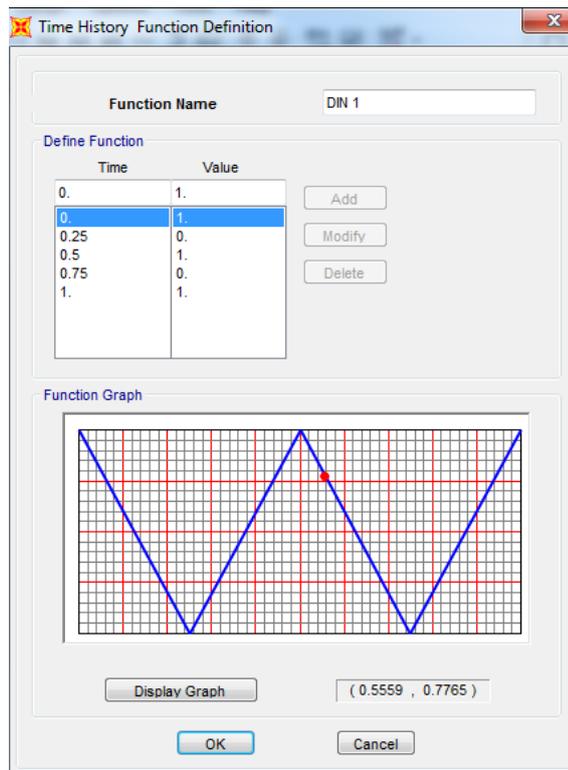
Los saltos oscilatorios se ejecutaron a cada medio segundo (0.5 s) y cada segundo (1.0 s) como se muestra en la tabla 24.

**Tabla 24.**

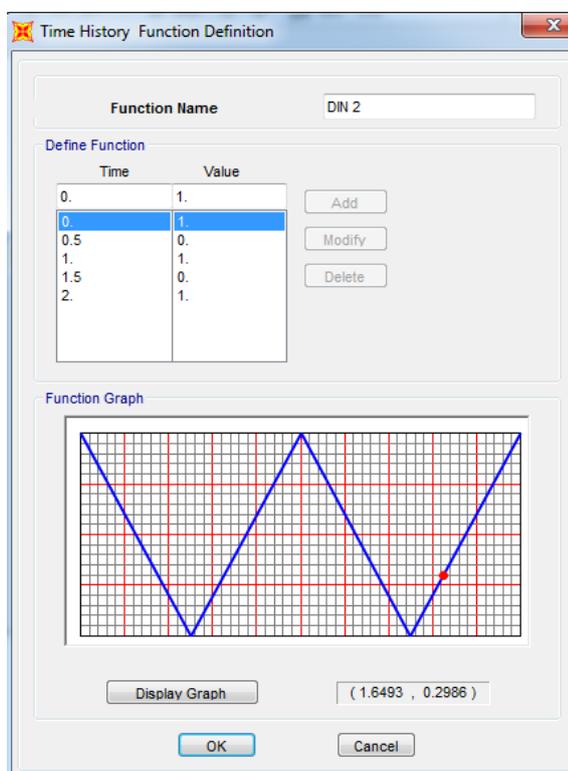
Frecuencias de saltos oscilatorios aplicados sobre estructura de GAK (Autor, 2014)

Punto	Aceleración	Frecuencia	
	(g)	DIN 1 (seg)	DIN 2 (seg)
1	1	0.00	0.00
2	0	0.25	0.50
3	1	0.50	1.00
4	0	0.75	1.50
5	1	1.00	2.00

En la ventana “definición funciones historia en el tiempo”, se asignó el nombre de “DIN 1” a la primera función, como “DIN 2” a la segunda, y se definió los valores de la frecuencia como se muestra en la figura 5.54 y figura 5.55.



**Figura 5.56.** Definición de frecuencia “DIN 1” en SAP2000.



**Figura 5.57.** Definición de frecuencia “DIN 2” en SAP2000.

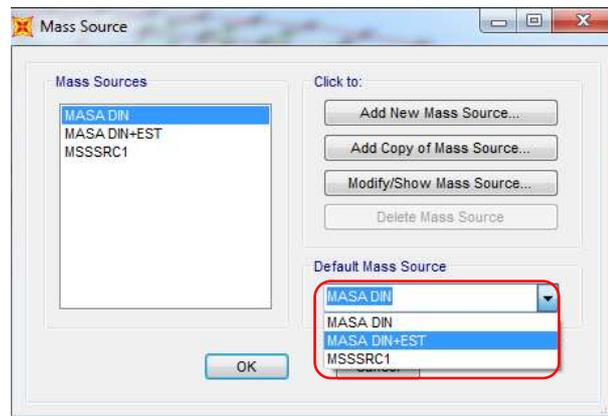
### 5.2.11 Asignación de fuente de masas.

Las funciones de historial en el tiempo en el software SAP2000 se aplicaron por defecto a las masas adicionales y la de los propios elementos “MSSSRC1”, para definir sobre qué tipos de carga actúa la función se definió la fuente de masa (**Mass Source**).

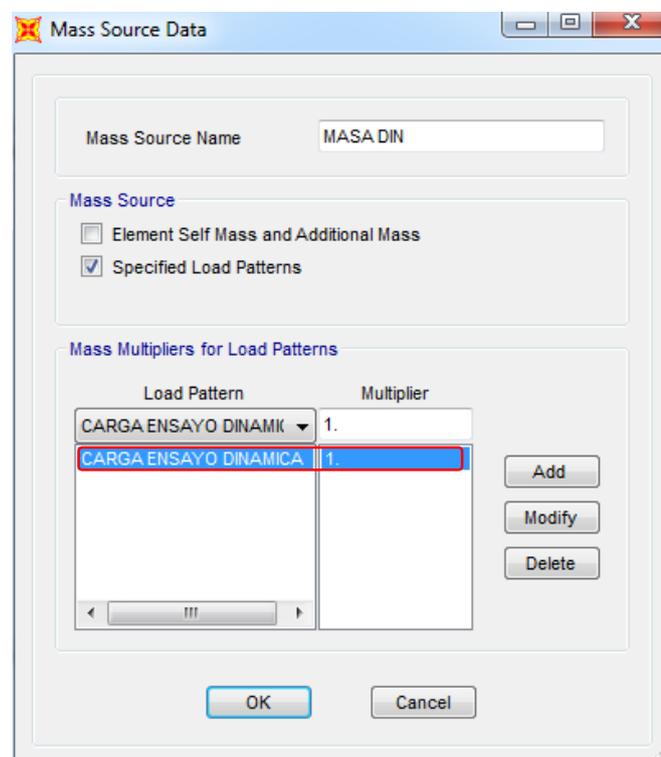


**Figura 5.58.** Opción definir “fuente de masa” en SAP2000.

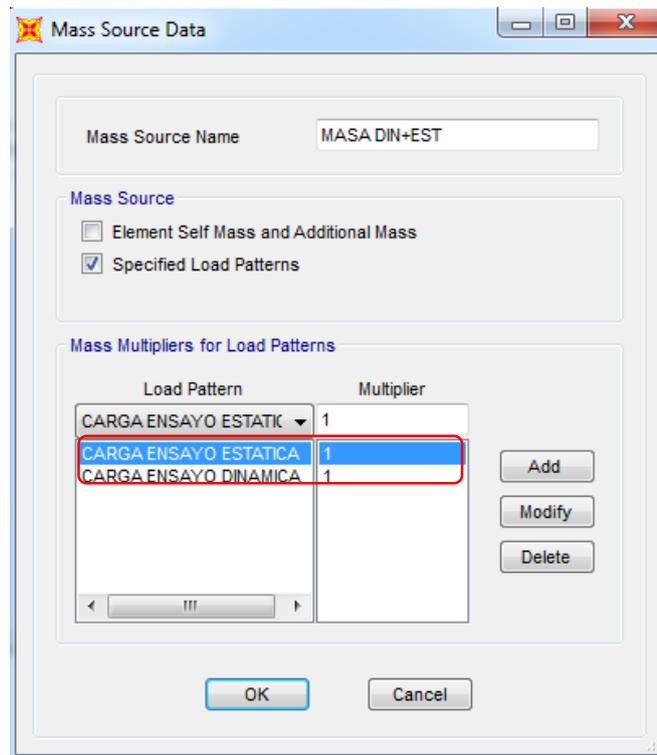
En la ventana “fuente de masa” se añadió dos tipos nuevos de fuente, la primera se denominó “MASA DIN” donde se tomó en cuenta solo las fuerzas del ensayo dinámico (figura 5.58), y la segunda que se llamó “MASA DIN+EST” en la que además se sumó las cargas del ensayo estático (figura 5.59), en el submenú fuente de masa por defecto (**Default Mass Source**) escogí la fuente a emplearse (figura 5.57).



**Figura 5.59.** Ventana fuente de masa, submenú masa por defecto en SAP2000.

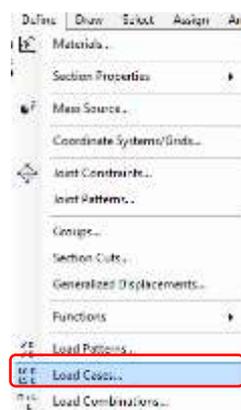


**Figura 5.60.** Definición de fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000.

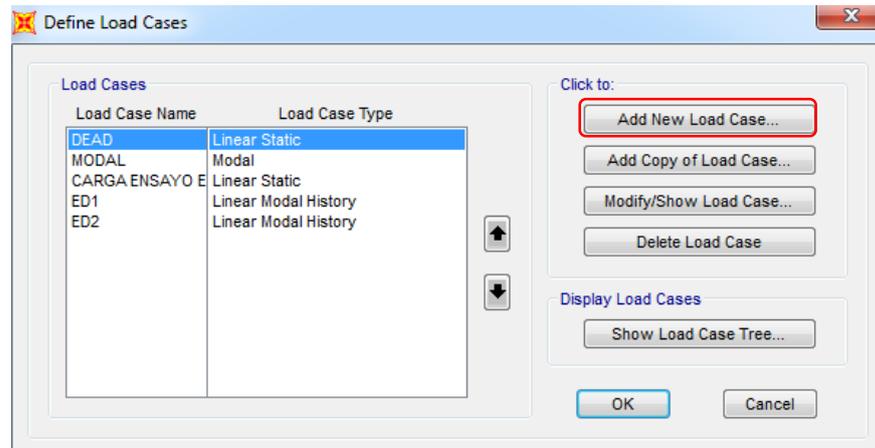


**Figura 5.61.** Definición de fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000.

Se definió los casos de cargas (**Load Cases**), se mostró una ventana auxiliar para definir los casos de cargas, en la que se muestran los casos de carga existentes (figura 5.61), se hizo clic en el botón añadir nuevo caso de carga (**Add New Load Case**).

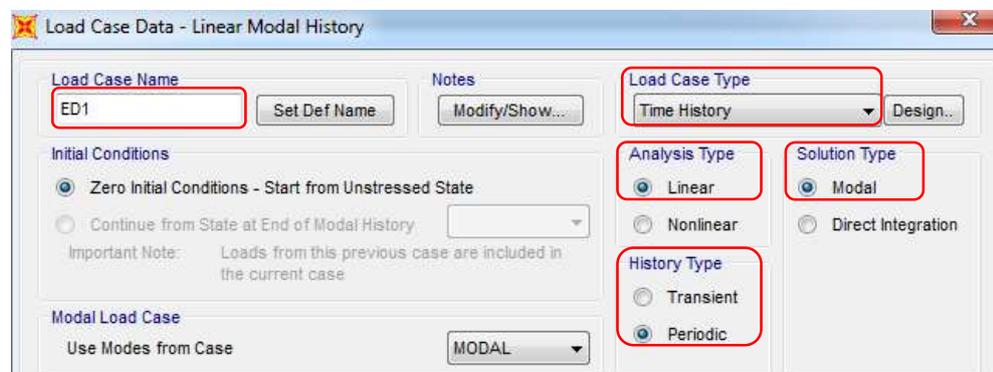


**Figura 5.62.** Opción definir “casos de carga” en SAP2000.



**Figura 5.63.** Ventana auxiliar “definir casos de carga”, botón “añadir nuevo caso de carga” en SAP2000.

El primero lo denomine “ED1” y se definió el tipo de caso de carga como historia en el tiempo (**Time History**), tipo de análisis lineal, el tipo de solución fue modal y el tipo de historia fue periódico (figura 5.62).



**Figura 5.64.** Caso de carga ED1, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal (pt.1)”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000.

Se estableció las cargas aplicadas en el caso específico de “ED1”, en tipo de carga fue “Tipos de Carga” definidos previamente, el nombre de la carga “CARGA ENSAYO DINÁMICA”, la función “DIN 1” y el factor de escala deja en uno (1), la fuente de masa establecida previamente “MASA DIN”, también se ingresó en número de datos de pasos en el tiempo (**Number of Output Time Steps**) 3000, y el tamaño de los pasos en el tiempo (**Output Time Step Size**) 0.02 (figura 5.63).

The screenshot displays the 'Loads Applied' dialog box in SAP2000. It features a table with columns for Load Type, Load Name, Function, and Scale Factor. Two load entries are listed: 'CARGA ENS' and 'AYO DINAMICA', both with 'DIN 1' as the function and a scale factor of 1. Below the table, there are 'Add', 'Modify', and 'Delete' buttons. A checkbox for 'Show Advanced Load Parameters' is present. The 'Time Step Data' section contains input fields for 'Number of Output Time Steps' (3000) and 'Output Time Step Size' (0.02). The 'Mass Source' is set to 'Previous (MASA DIN)'. The 'Other Parameters' section shows 'Modal Damping' set to 'Constant at 0.05' with a 'Modify/Show...' button. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	CARGA ENS	DIN 1	1.
Load Pattern	AYO DINAMICA	DIN 1	1

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 3000

Output Time Step Size: 0.02

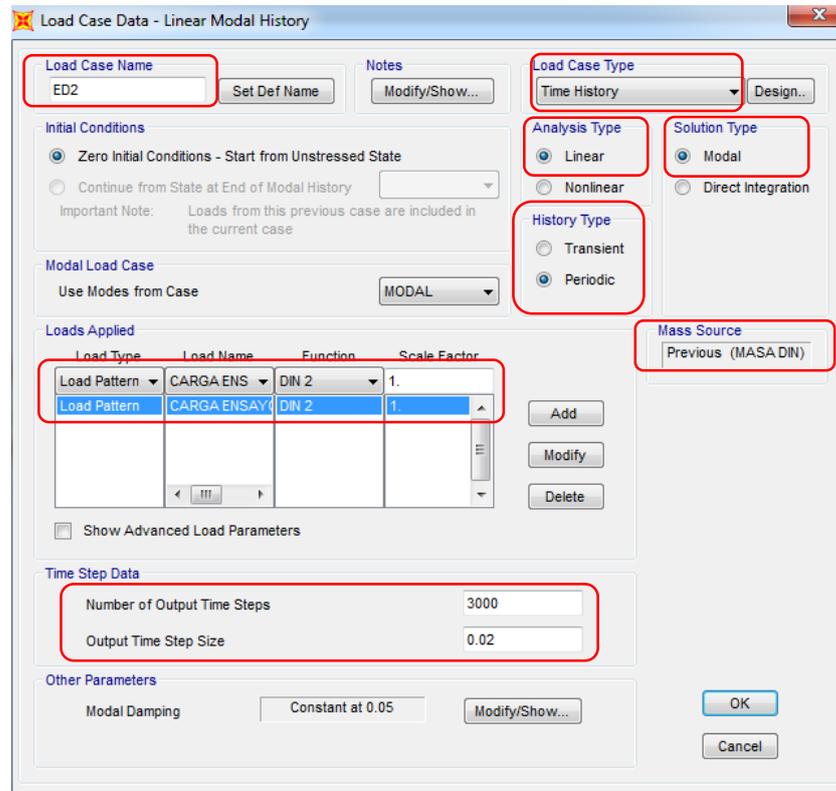
Mass Source: Previous (MASA DIN)

Other Parameters

Modal Damping: Constant at 0.05

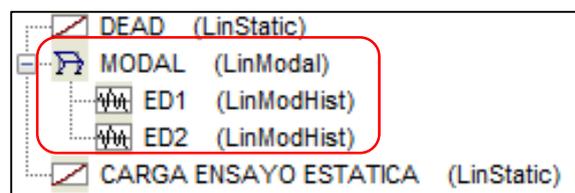
**Figura 5.65.** Caso de carga ED1, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal (pt.2)”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000.

Se reiteró el procedimiento anterior, denomine “ED2” como el nombre del caso de carga, la única diferencia respecto a la configuración previa es el cambio de función por “DIN 2”, el resto de valores se conservaron (figura 5.64).



**Figura 5.66.** Caso de carga ED2, ventana auxiliar “datos casos de carga – historia lineal modal”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000.

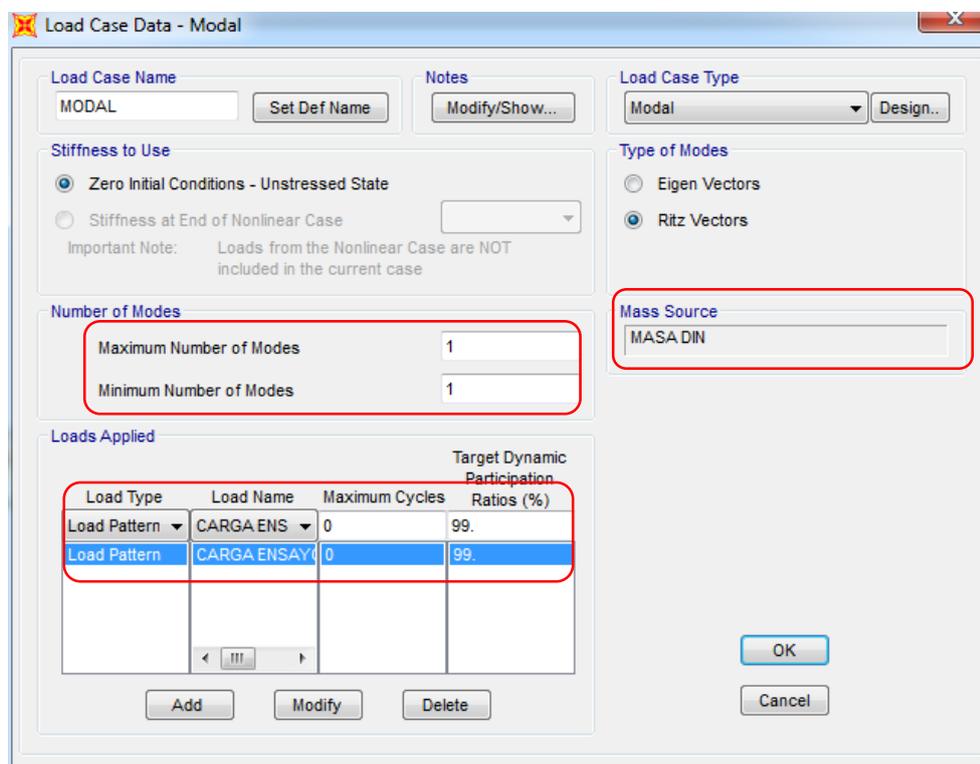
Se realizó un ajuste final en el caso de carga “MODAL”, por ser el encargado de simular los modos de vibración de la estructura, además contiene los casos de vibración ED1 y ED2 (figura 5.65).



**Figura 5.67.** Árbol de casos de carga (Load Case Tree) en SAP2000.

Se realizó las siguientes modificaciones al caso de carga “MODAL”, los tipos de modo se cambian a “Ritz Vectors” por brindar un mayor rango de exactitud de los predeterminados por defecto, establecimos el número máximo y mínimo de modos en uno (1) al dejar solo un modo de vibración el programa mostrará el más crítico

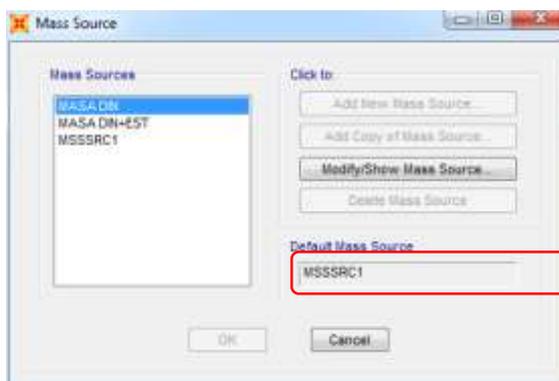
automáticamente, la fuente de masa permaneció determinada como “MASA DIN”, y el tipo de carga fue la “CARGA DE ENSAYO DINAMICA”.



**Figura 5.68.** Caso de carga “MODAL”, opciones establecidas por el usuario en SAP2000.

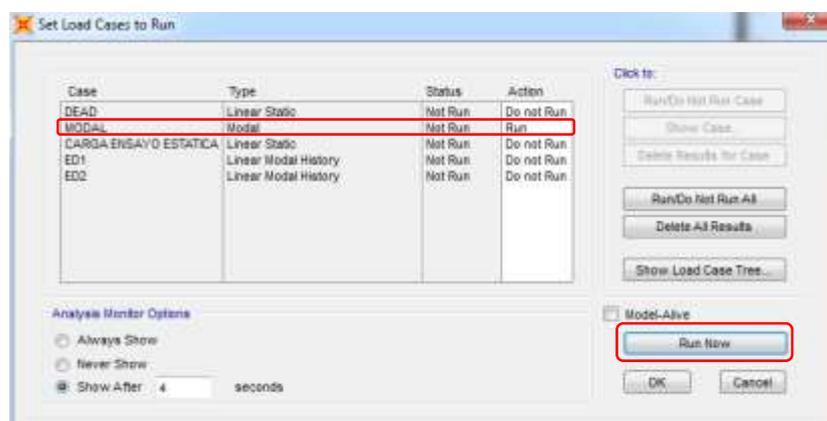
### 5.2.12 Resultados de aplicación de carga dinámica y funciones periódicas.

Con la fuente de masas “MSSSRC1”, que por defecto ocupa la masa de todos los elementos de la estructura obtuvimos el período de la estructura previa la aplicación de las cargas del ensayo de carga estática y dinámica (figura 5.67).



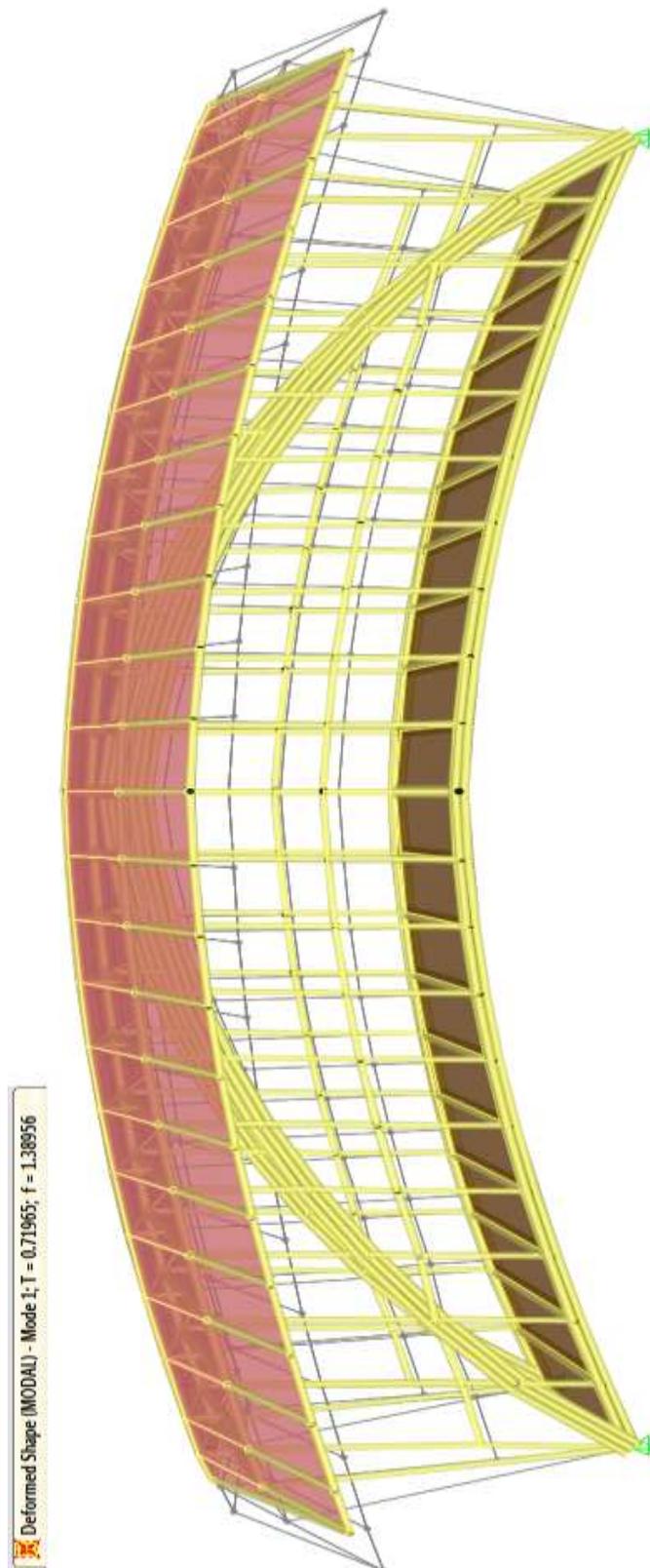
**Figura 5.69.** Definición de “MSSSRC1” como fuente de masas en SAP2000.

Finalmente con la masa “MSSSRC1” se corrió el análisis de la estructura en el botón “Reproducir” , se mostró una ventana auxiliar para definir los casos de carga que se consideraron para el análisis, en esta ocasión solo se tomó el caso “MODAL” y se hizo clic en “Run Now”.



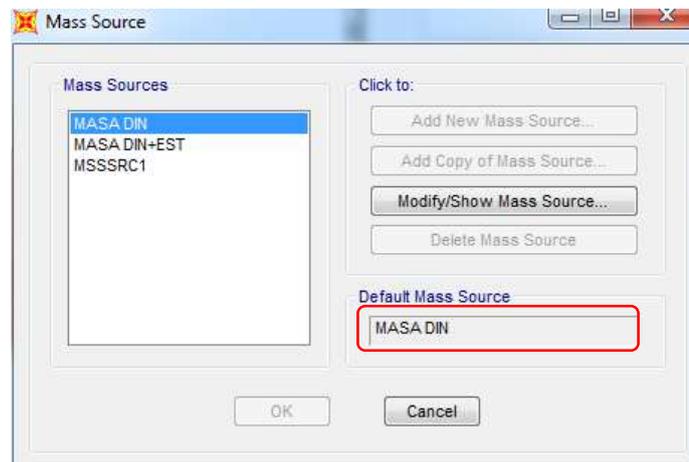
**Figura 5.70.** Programación caso de carga “MODAL” para el análisis en SAP2000.

Una vez corrido el análisis, se obtiene la forma deformada de la estructura, así como el período de vibración de la estructura  $T= 0.71965$  y la frecuencia  $f= 1.38956$  como se muestra en la figura (5.69).



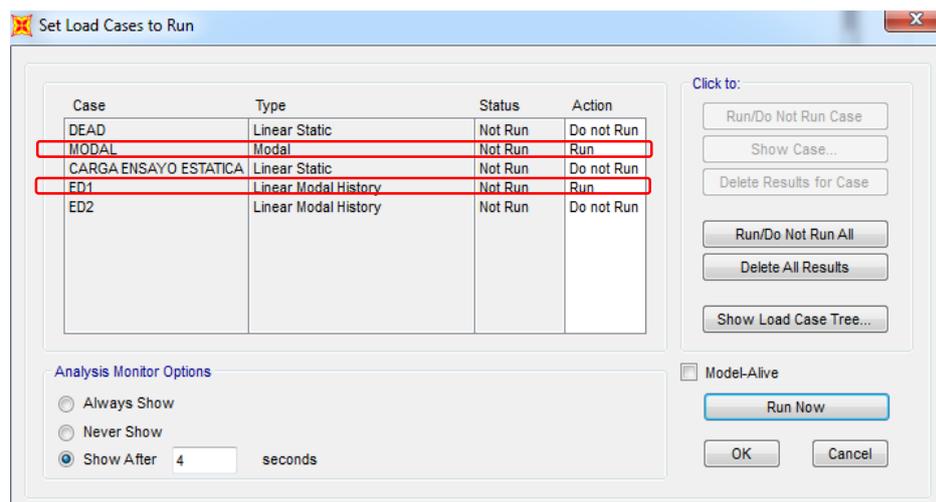
**Figura 5.71.** Resultados y forma deformada del caso “MODAL” con fuente de masa “MSSSRC1” en SAP2000.

Se reiteró el proceso, se cambió la fuente de masas “MASA DIN”, que ocupa las cargas dinámicas, obtuvimos el período de la estructura tras la aplicación de las cargas del ensayo dinámico (figura 5.70).



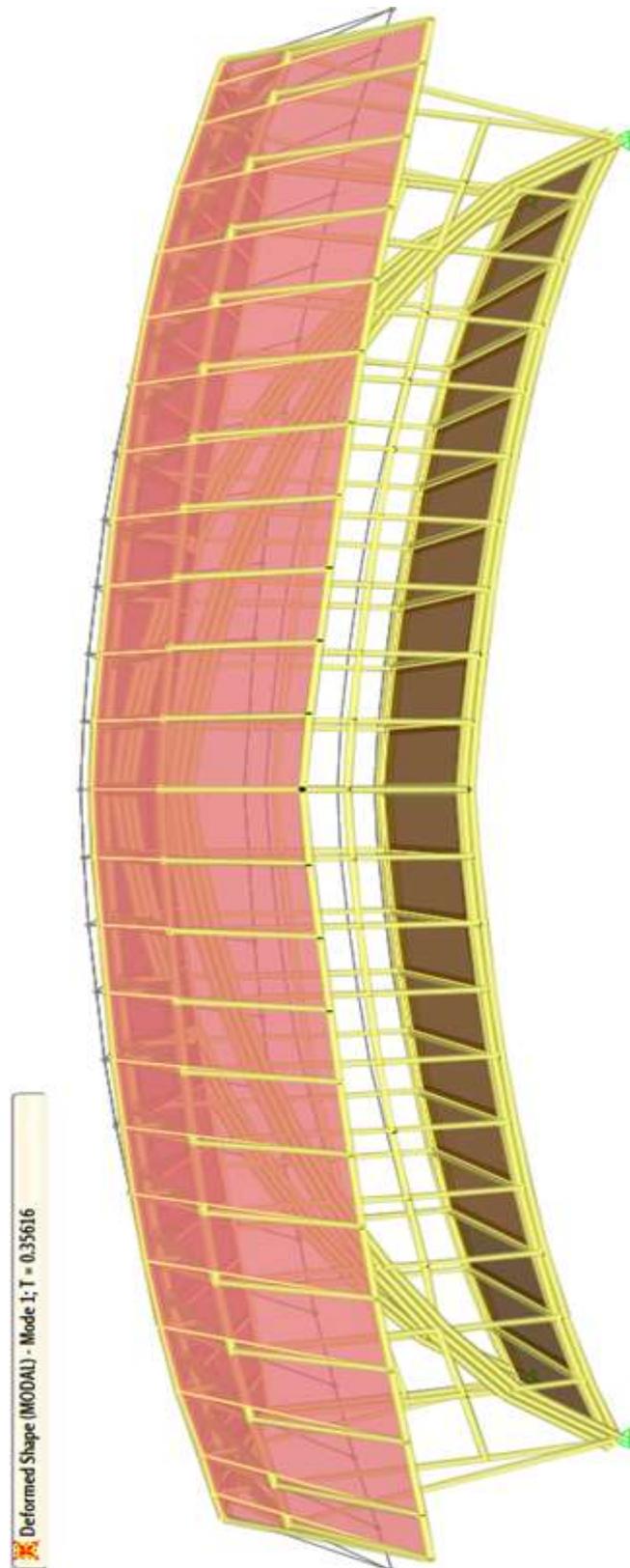
**Figura 5.72.** Definición de “MASA DIN” como fuente de masas en SAP2000.

En la ventana auxiliar se definió los casos de carga considerados para el análisis, en esta ocasión se tomó el caso “MODAL” y “ED1” con la función oscilatoria periódica “DIN 1” representando saltos cada 0.5 s, y se hizo clic en “Run Now”.



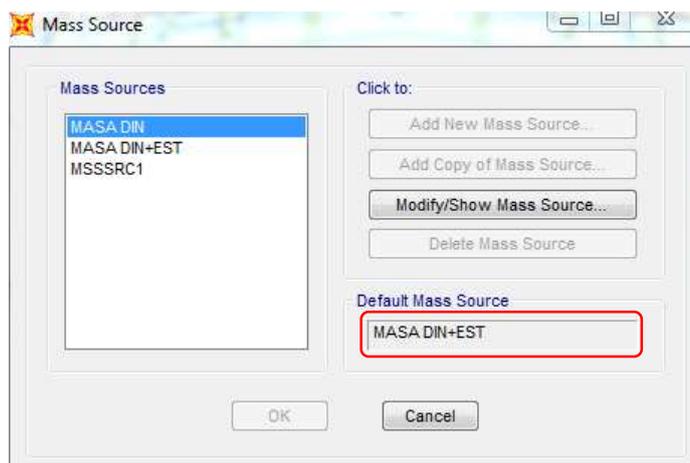
**Figura 5.73.** Casos de carga “MODAL” Y “ED1” para el análisis en SAP2000.

Se consiguió la forma deformada de la estructura, así como el período de vibración de la estructura  $T= 0.35616$  y la frecuencia  $f= 2.80771$  como se muestra en la figura (5.72).



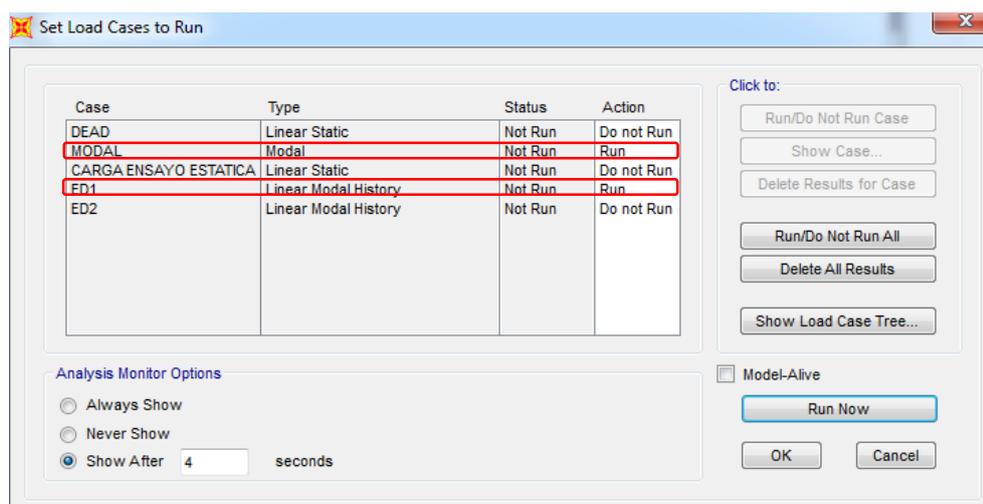
**Figura 5.74.** Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED1” función “DIN 1”, con fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000.

Una vez más, cambie la fuente de masas a “MASA DIN+EST”, que ocupa las cargas estáticas además de las dinámicas, obtuvimos el período de la estructura tras la aplicación de las carga del ensayo estático y oscilación de la carga dinámica (figura 5.73).



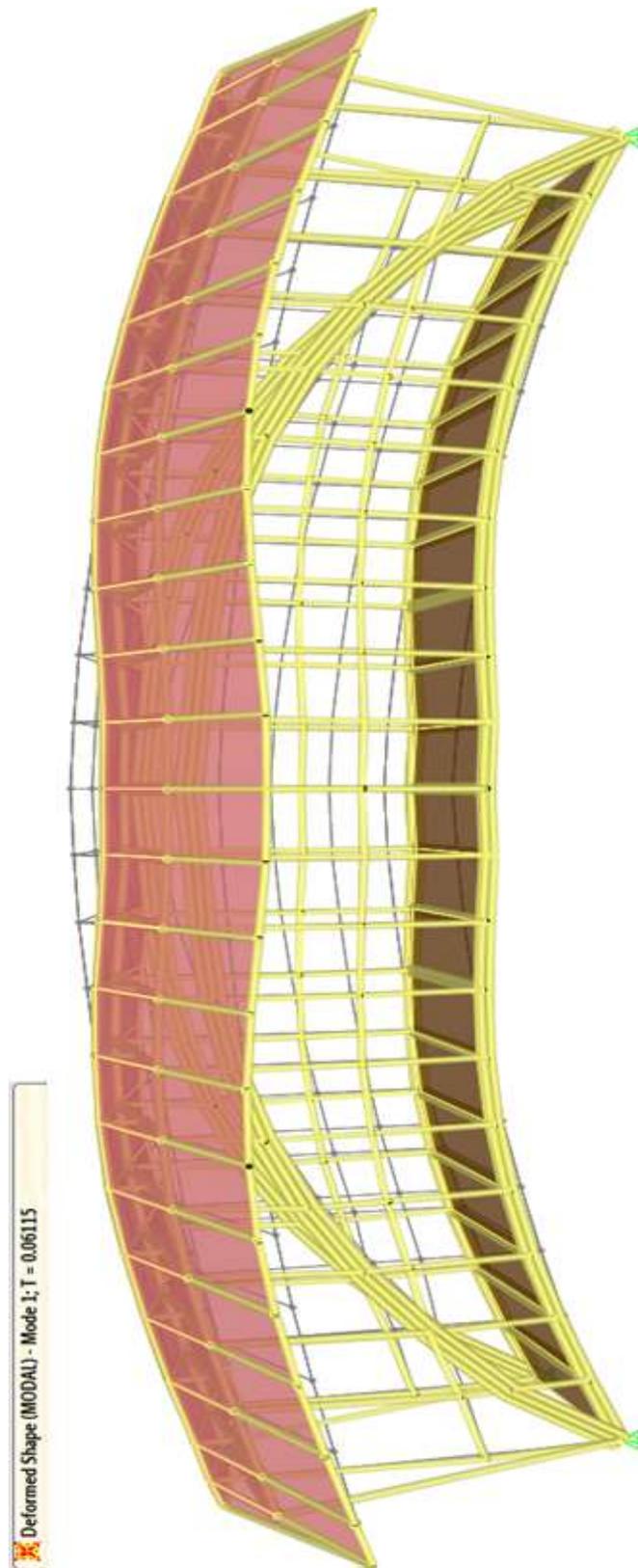
**Figura 5.75.** Definición de “MASA DIN+EST” como fuente de masas en SAP2000.

En la ventana auxiliar se definió los casos de carga considerados para el análisis, en esta ocasión se tomó el caso “MODAL” y “ED1” con la función oscilatoria periódica “DIN 1” representando saltos cada 0.5 s, y se hizo clic en “Run Now”.



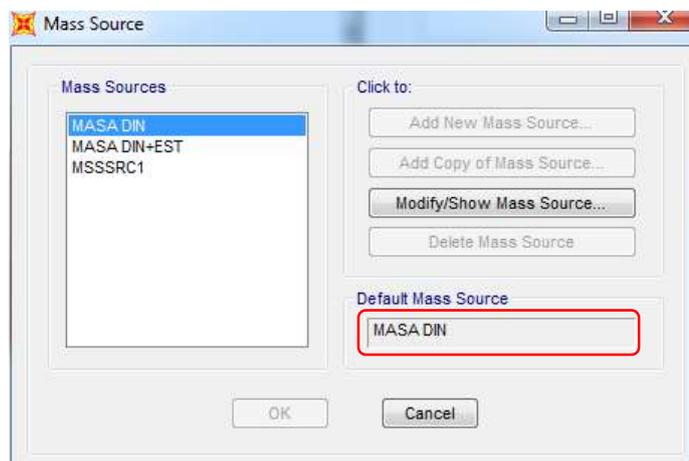
**Figura 5.76.** Casos de carga “MODAL” y “ED1” para el análisis en SAP2000.

Obtuvimos la forma deformada de la estructura, así como el período de vibración de la estructura  $T= 0.06115$  y la frecuencia  $f= 16.35297$  como se muestra en la figura (5.75).



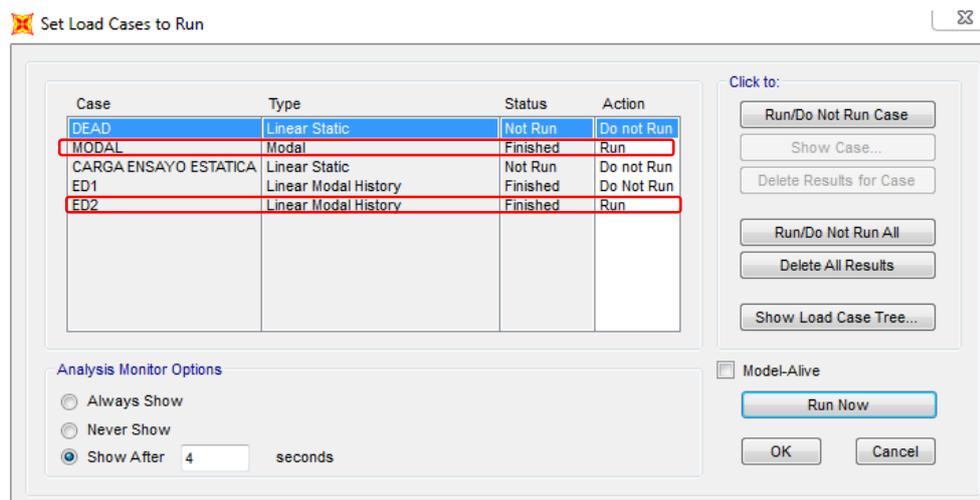
**Figura 5.77.** Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED1” función “DIN 1”, con fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000.

Se reiteró el proceso, se cambió la fuente de masas “MASA DIN”, que ocupa las cargas dinámicas, obtuvimos el período de la estructura tras la aplicación de las cargas del ensayo dinámico (figura 5.76).



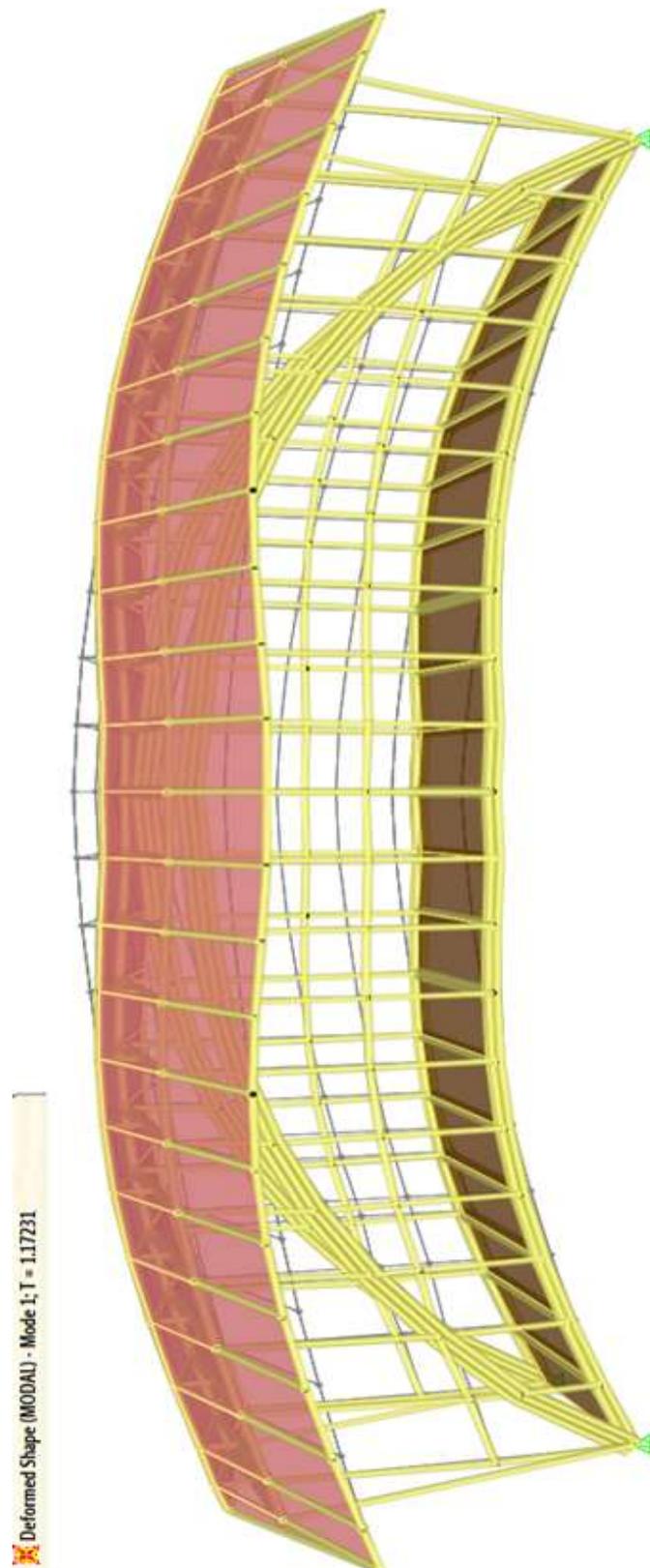
**Figura 5.78.** Definición de “MASA DIN” como fuente de masas en SAP2000.

En la ventana auxiliar se definió los casos de carga considerados para el análisis, en esta ocasión se tomó el caso “MODAL” y “ED2” con la función oscilatoria periódica “DIN 2” representando saltos cada 1 s, y se hizo clic en “Run Now”.



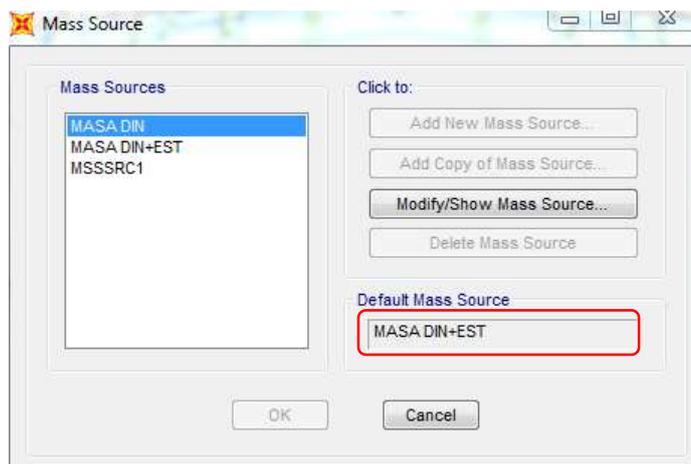
**Figura 5.79.** Casos de carga “MODAL” Y “ED2” para el análisis en SAP2000.

Se consiguió la forma deformada de la estructura, así como el período de vibración de la estructura  $T= 1.17231$  y la frecuencia  $f= 5.80365$  como se muestra en la figura (5.78).



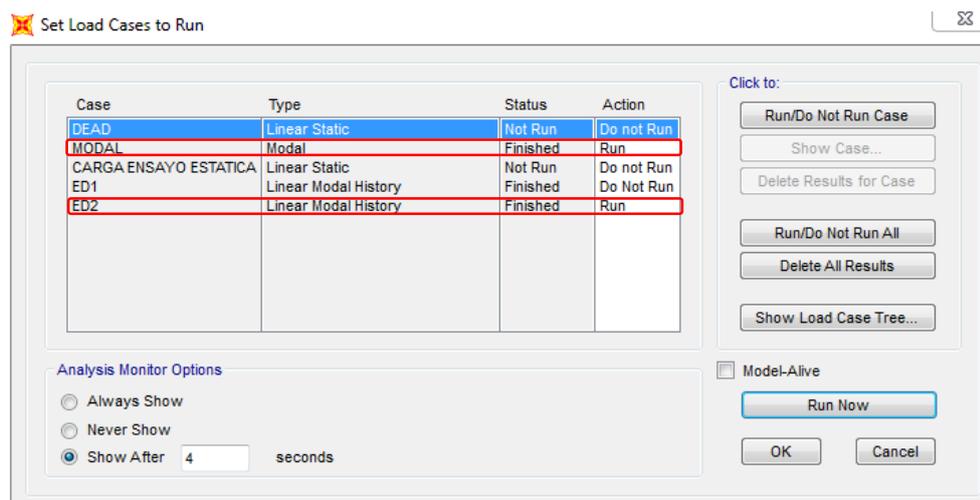
**Figura 5.80.** Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED2” función “DIN 2”, con fuente de masa “MASA DIN” en SAP2000.

Se reiteró el proceso, se cambió la fuente de masas “MASA DIN+EST”, que ocupa las cargas dinámicas, obtuvimos el período de la estructura tras la aplicación de las cargas del ensayo dinámico (figura 5.79).



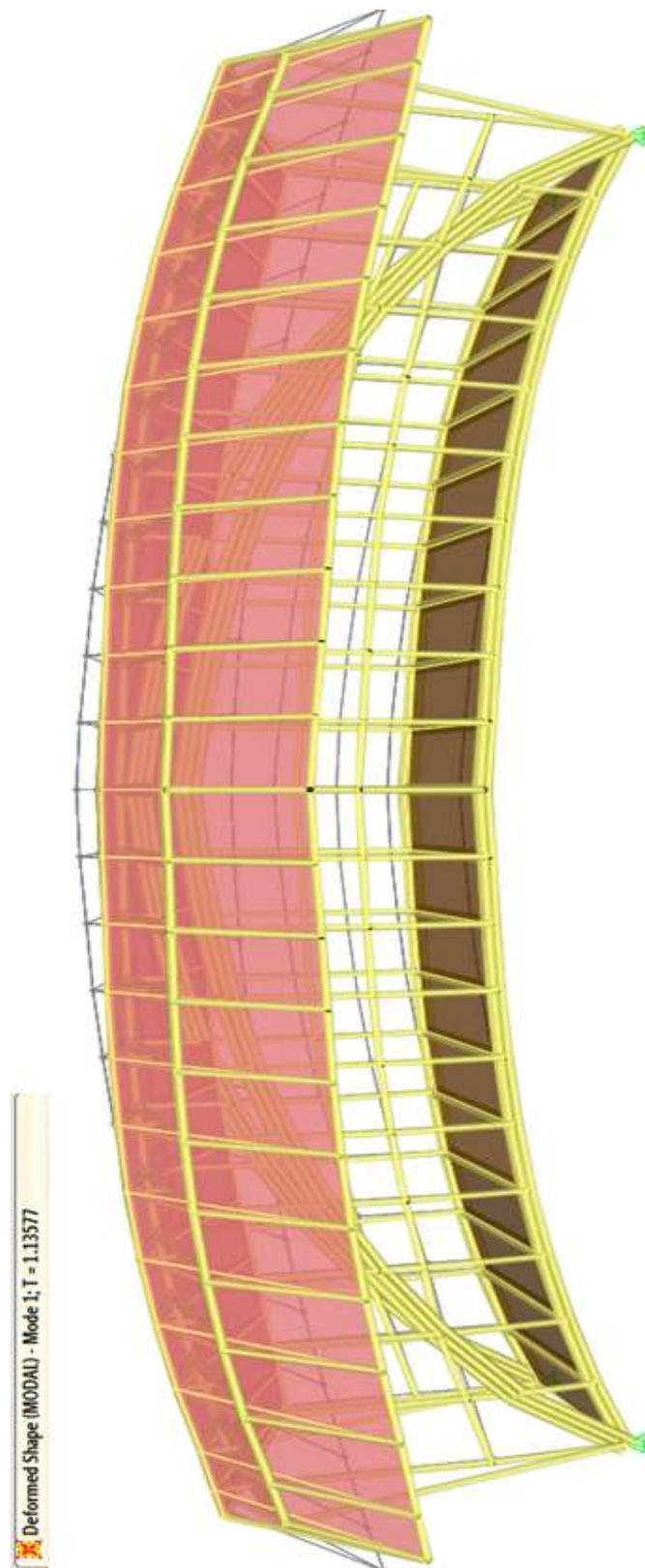
**Figura 5.81.** Definición de “MASA DIN+EST” como fuente de masas en SAP2000.

En la ventana auxiliar se definió los casos de carga considerados para el análisis, en esta ocasión se tomó el caso “MODAL” y “ED2” con la función oscilatoria periódica “DIN 2” representando saltos cada 1 s, y se hizo clic en “Run Now”.



**Figura 5.82.** Casos de carga “MODAL” Y “ED2” para el análisis en SAP2000.

Se consiguió la forma deformada de la estructura, así como el período de vibración de la estructura  $T= 1.13557$  y la frecuencia  $f= 7.36555$  como se muestra en la figura (5.81).



**Figura 5.83.** Resultados y forma deformada del caso “MODAL” y “ED2” función “DIN 2”, con fuente de masa “MASA DIN+EST” en SAP2000.

## **CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN PARA UN PUENTE PEATONAL DE GAK**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

La construcción de puentes peatonales a base de la caña guadúa (nombre científico *Guadúa angustifolia* kunth, abreviación GAK) requiere conocimientos técnicos específicos y fundamentales, como por ejemplo, preparativos iniciales de la caña, una cimentación adecuada, uniones o juntas apropiadas y una amplia cubierta que proteja la estructura de la lluvia. El conocimiento de estos y otros requerimientos técnicos garantizan una vida útil de hasta 50 años para un puente peatonal de GAK (Stamm, 2010).

En este trabajo se detalla cada uno de los procedimientos a seguir desde los preparativos de la caña que se utilizará para la construcción del puente peatonal hasta su mantenimiento a lo largo del tiempo.

Se socializó durante el 2011 en la Norma Ecuatoriana de Construcción el capítulo 17 que trataba sobre la GAK en la construcción pero fue removido del repositorio digital para evaluar y completar la sección del diseño estructural.

### **6.2 OBJETIVO**

Crear un instrumento de información en el cual se describen, en forma secuencial, procedimientos de trabajo validados que deben seguirse para la construcción de un puente peatonal de GAK.

### **6.3 ALCANCE**

A través del presente manual se pretende crear fundamentos técnicos para el Ingeniero responsable de la construcción de un puente peatonal de GAK, garantizando

una mayor vida útil de la obra y brindando seguridad para todos sus usuarios. Por lo tanto, se dará cumplimiento a las leyes ecuatorianas de construcción vigentes.

#### **6.4 RESPONSABLES**

El Ingeniero encargado de la construcción del puente peatonal de GAK, será el responsable de sujetarse a los procedimientos de trabajo establecidos en él. Y asegurará el cumplimiento de estos procedimientos a todos los empleados bajo su cargo.

Antes de efectuar la construcción de un puente, es necesario realizar con exactitud los cálculos estructurales, verificar la eficacia del diseño y hacer los ajustes respectivos en la construcción, que garanticen la seriedad y la calidad de la obra.

#### **6.5 ANTECEDENTES**

Guía de práctica de 1976, BAMBÚ CAÑA GUADÚA RECOMENDACIONES PARA EL USO EN LA CONSTRUCCIÓN una publicación ya discontinuada, así como capítulo 17 del NEC-11 que actualmente se encuentra en proceso de evaluación.

#### **6.6 PREPARATIVOS INICIALES**

Se inicia con el reconocimiento del sitio, la limpieza del solar, la seguridad de las edificaciones colindantes, la ubicación de la caseta de guardianía y de la bodega de materiales, la acometida provisional de energía eléctrica y de agua, la ubicación de letrinas temporales, el cerramiento provisional y perimetral de la obra (MIDUVI, 2013).

#### **Marco legal**

Para la obtención de los pliegos de permisos municipales y legales, se deben presentar los diseños arquitectónicos, estructurales, de instalaciones y análisis de

suelos realizados por profesionales y empresas acreditados en el área de especialidad (MIDUVI, 2013).

### **Contratación para la adquisición de los culmos de GAK**

Con anticipación de no menos dos meses, al inicio de la obra el constructor realizará la contratación para la adquisición de los culmos de GAK, requeridos, tanto en calidad, cantidad, como en longitud, diámetros, conicidad, de acuerdo a los planos y diseños realizados (MIDUVI, 2013).

La contratación debe asegurar la fecha de entrega de los culmos de GAK, debidamente secos y preservados. El constructor establecerá en el contrato el % de humedad y el tipo de preservación requerido y más detalles (MIDUVI, 2013).

El contratista extenderá al constructor una garantía de calidad donde, además del número de culmos, longitudes, diámetros y fechas, se especifiquen: las características de los culmos a entregar; el % de contenido de humedad del material al pie de obra; el método de preservación utilizado y la identificación del preservante. Como regla general, las guadúas para uso estructural deben estar secas al momento de fabricación por debajo del 19% CH, pero no menos del 10% CH (MIDUVI, 2013).

### **Transporte de los culmos**

Los culmos deben ser transportados en vehículos cubiertos para evitar que la lluvia los moje (MIDUVI, 2013). El número máximo de culmos apilados uno sobre el otro será de siete. Debe evitarse sobrecargar los miembros estructurales durante el transporte y almacenamiento. Se evita que los elementos de guadúa sobre salgan de la carrocería del vehículo, de no ser posible, los elementos deben ser zunchados de manera adecuada. (NSR-10 R. C., 2010).

### **Almacenamiento de los culmos**

La guadúa es un material higroscópico y poroso que absorbe el agua presente en el ambiente en forma de vapor o de líquido. Si la humedad de la guadúa se incrementa se hará más vulnerable al ataque biológico, por lo tanto, es recomendable que los culmos sean entregados y recibidos en una bodega o sitio cubierto, ventilado, seco, con buen drenaje y un piso o contra piso de cemento. Preferiblemente los culmos deben ser almacenados en posición vertical (NSR-10 R. C., 2010).

El sitio deberá permitir un adecuado almacenamiento (Figura 6.1) y sobre todo para el pre dimensionamiento y corte de los componentes estructurales para la construcción del puente peatonal. No es recomendable almacenar los culmos al aire libre ni directamente en el suelo (Figura 6.2) (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.1.** Colocación de la guadúa sobre un pedestal y bajo techo (Teneche, 2011).



**Figura 6.2.** No se debe colocar directamente en el suelo la guadúa destinada para la construcción del puente peatonal de GAK (Stamm, 2010).

### **Control de calidad al pie de la obra**

A la recepción de los culmos, el constructor deberá examinar y comprobar de manera inmediata los siguientes aspectos:

- Las dimensiones contratadas tanto en longitud como en diámetro y conicidad.
- La rectitud de los culmos.
- La conicidad.
- El contenido de humedad mediante el uso de un hidrómetro. El CH admitido como máximo debe ser el 19% (y no menor al 10%), para prevenir la ausencia de ataque de hongos, la proliferación de insectos y una potencial deformación futura (MIDUVI, 2013).
- Los culmos que no cumplan las condiciones establecidas, deben desecharse y pedir su reposición (MIDUVI, 2013).

### **Limpieza del terreno**

El terreno debe limpiarse de todo material vegetal y deben realizarse todas las obras de drenaje necesarias para asegurar la menor incidencia de la humedad (Figura

6.3). Se deben tomar las medidas necesarias que impidan el crecimiento de vegetación y anidamiento de animales en la estructura del tablero, en la cercha del pasamanos y de la cubierta (NSR-10 R. C., 2010).



**Figura 6.3.** Limpieza del terreno para la construcción (Stamm, 2010).

### **Categorización de la guadúa**

Teniendo en cuenta que cada guadúa es diferente, con la lista del material necesario, se selecciona la guadúa en grupos de acuerdo a diámetro, tamaño y funciones (cinta o arco superior, arco principal o de carga, arco inferior o de piso, barandal, diagonal, poste, etc.) (Stamm J. , 2010), de la siguiente manera:

- Separar las guadúas cilíndricas más rectas y gruesas para postes y diagonales a compresión. Las menos gruesas y derechas para diagonales tensionadas y correas (Figura 6.4) (Stamm J. , 2010).
- Separar las más gruesas y que tengan una sola curvatura para el arco principal o de carga y las que no sean tan gruesas, pero también con una sola curvatura, para los arcos superior e inferior y para los barandales (Figura 6.5) (Stamm J. , 2010).

- Separar las guadúas torcidas, que tienen 2 o más curvaturas, las cuales sirven para usar en segmentos, en el piso porque éste lleva concreto y no quedan a la vista (Figura 6.5) (Stamm J. , 2010).
- Separar las guadúas que son cónicas. Es decir, la base o cepa más gruesa y el vértice o cola más delgada, las cuales se pueden aprovechar en secciones para diferentes usos, de acuerdo a su diámetro, como por ejemplo: los caballetes o pares del techo (Stamm J. , 2010).



**Figura 6.4.** Categorización de guadúas rectas y gruesas con diferentes diámetros (Stamm J. , 2010).



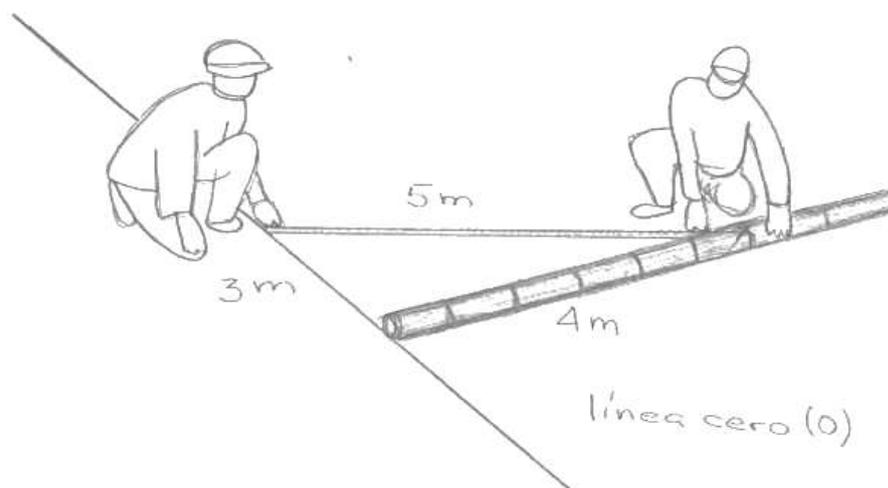
**Figura 6.5.** Categorización de guadúas, con una o más curvas (Stamm J. , 2010).

### Acta de vecindad

De ser necesario, antes de iniciar la construcción deberá levantarse un acta con los vecinos y personas aledañas a la construcción, para hacer un inventario de grietas o fisuras existentes si las hay, así como también los estados de las estructuras aledañas a la obra (techos, muros, revoques, etc). Este inventario debe hacerse con registro fotográfico fechado (Lucker, 2010).

### Planteamiento de cotas

En un sitio amplio y plano, cerca de la obra, se delimita la línea cero (0), colocando un cable o un alambre grueso bien tensionado, en el cual se marcan las cotas de los ejes y en cada eje se coloca perpendicularmente una guadúa, utilizando el sistema de Pitágoras (ver Figuras 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9) (Stamm, 2010).



**Figura 6.6.** Planteamiento de cotas utilizando el sistema de Pitágoras (Stamm, 2010).



**Figura 6.7.** Colocación del cable para la línea cero, y guadúas perpendiculares al cable para marcación de cotas (Stamm, 2010).



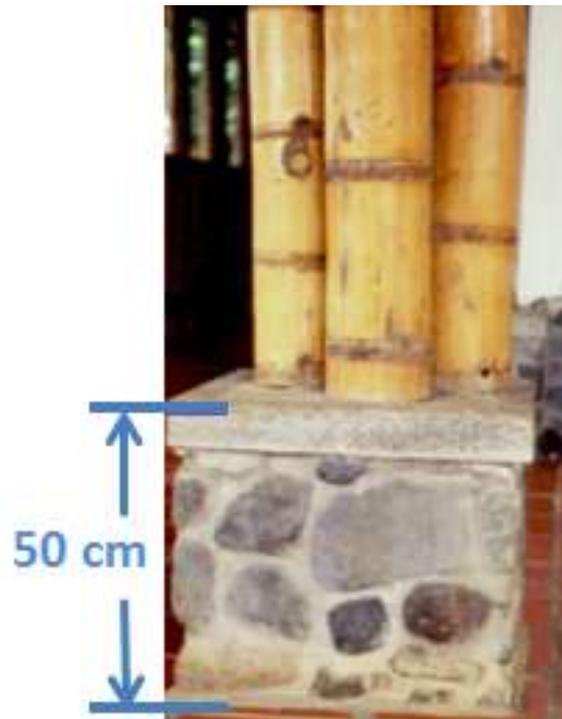
**Figura 6.8.** Colocación de cable y guadúa perpendicular (Stamm, 2010).



**Figura 6.9.** Nivel utilizado para alineación de cotas (Stamm, 2010).

## **6.7 CIMIENTOS**

Con base en el tipo de proyecto a desarrollar, se recomienda diseñar una fundación zapata cuadrada individual (sobre-cimiento), la cual debe tener un mínimo de 50 cm de altura sobre el nivel cero (Figura 6.10) debido a que la altura máxima de salpicadura es de 40 cm, y una profundidad de desplante entre 1.50 y 2.40 m dependiendo de la altura del puente (Figura 6.11) (Lucker, 2010).



**Figura 6.10.** Zapata cuadrada individual (sobre-cimiento) de 50 cm de altura (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.11.** Profundidad de desplante entre 1.50 y 2.40 (Lucker, 2010).

En la Figura 6.12 se muestra otro tipo de zapata recomendable para la construcción del puente peatonal de GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.12.** Zapata cuadrada con arco para mejor adaptación de GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).

El estrato para la cimentación se recomienda: de arena limosa color amarillento, una capacidad portante de  $22.5 \text{ ton}/\text{m}^2$ , un coeficiente de fricción suelo concreto de 1.0, una densidad de  $1.079 \text{ ton}/\text{m}^3$  y un ángulo de fricción suelo cimentación de  $12^\circ$  (Lucker, 2010).

Cuando se realice la excavación para los cimientos, en caso de encontrar un suelo de mala calidad o un nivel freático muy alto, deberá consultarse con el ingeniero de suelos para que haga la recomendación respectiva y determine si amerita o no el cambio de sistema de cimentación a otro (Lucker, 2010).

Para el proceso constructivo de la cimentación se deberá tener en cuenta entre otras, las siguientes recomendaciones:

- Continuidad en el proceso de excavación y vaciado para la cimentación.

- No dejar mucho tiempo la excavación expuesta a las aguas lluvias y/o escorrentía, para evitar la saturación del suelo, lo que conllevaría a que se presenten asentamientos de gran magnitud.
- En los taludes laterales de los accesos se recomienda reforestar con grama y especies nativas que permitan amarre de las raíces al suelo y permitan una mayor estabilidad del mismo (Stamm, 2010).

Los culmos no pueden estar directamente enterrados, apoyados en el suelo o inmersos en la masa del concreto de la cimentación o en cualquier otro componente de hormigón (Figura 6.13) (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.13.** Resultado negativo de la embebida de GAK directamente en una pared (FUNDEGUADUA A. , 2010).

## **6.8 ANCLAJE DE GAK A LOS SOBRE-CIEMENTOS**

Los culmos deben estar alejados del suelo y apoyados sobre zócalos, pedestales sobre-cimientos de hormigón armado, que servirán como sobre cimientos (MIDUVI, 2013).

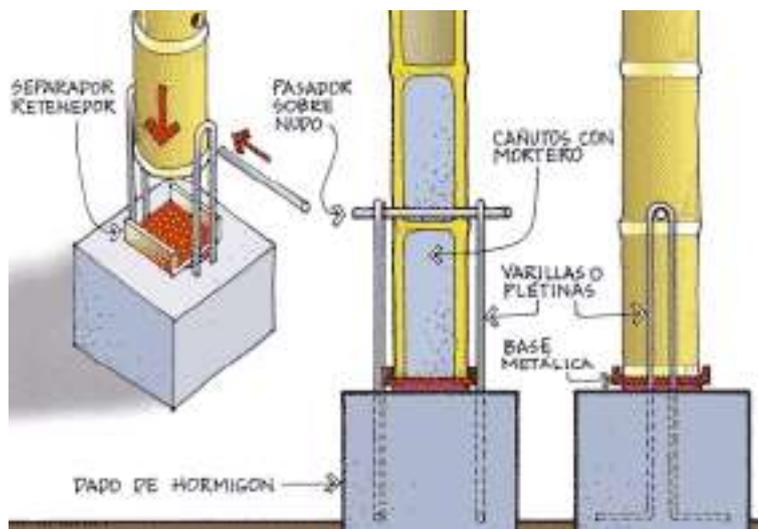
La superficie de los apoyos, antes mencionados, zócalos, pedestales o pilaretes debe estar cubierta con una capa anti capilar de asfalto, breá o similares, para evitar el ascenso de la humedad por capilaridad (MIDUVI, 2013). Se recomienda adicionar aditivo impermeabilizante al concreto utilizado para el sobre-cimiento (Lucker, 2010).

Si existe posibilidad de la presencia de termitas, se recomienda que sobre la capa anti capilar, se coloque una plancha metálica de 2 mm de espesor, que cubra la cabeza del sobre cimiento y sobresalga 2 mm de los bordes de aquel. Esta plancha metálica será protegida con anticorrosivos (MIDUVI, 2013).

### **Anclaje con varillas de acero exteriores**

La guadúa no debe estar en contacto directo con el concreto del sobre-cimiento. Así que se deberá apoyar la guadúa sobre un separador de acero u otro material impermeable (AIS, 2002).

Las fuerzas de compresión se transmiten a través del separador, por lo que debe apoyarse en forma continua en la sobre-cimentación. El separador debe actuar como elemento resistente a corte, es decir, como tope para el movimiento horizontal entre el muro y el cimiento. Para ello, el separador debe abrazar el elemento de guadúa. El separador-retenedor debe ser una pletina de acero con, por lo menos, 3,2 mm de espesor y la misma anchura de la guadúa que retiene (Figura 6.14) (AIS, 2002).



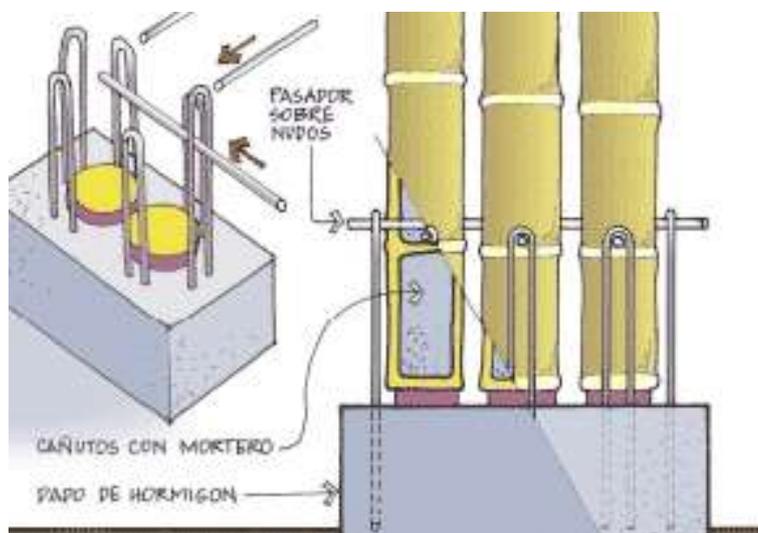
**Figura 6.14.** Anclaje con varillas exteriores (AIS, 2002).

Las fuerzas de tracción se transmiten a través de conexiones apernadas. Un perno atraviesa el primer o el segundo canuto de la guadúa. El canuto atravesado y cualquier canuto por debajo de éste, deben rellenarse con mortero 1:2 (Figura 6.15). El canuto debe tener un nudo en su extremo inferior. El perno se ancla al sobre-cimiento a través de varillas con ojales, o barras dobladas. Esta conexión resiste tracción. No es apropiada para resistir momento. Por lo tanto, no es necesario atravesar pernos en ambas direcciones (AIS, 2002).



**Figura 6.15.** Relleno de canuto con mortero 1:2 para anclaje a sobre-cimiento (FUNDEGUADUA A. , 2010).

La unión con varillas externas también sirven para anclar varias guadúas a los sobre-cimientos (Figura 6.16) (AIS, 2002).

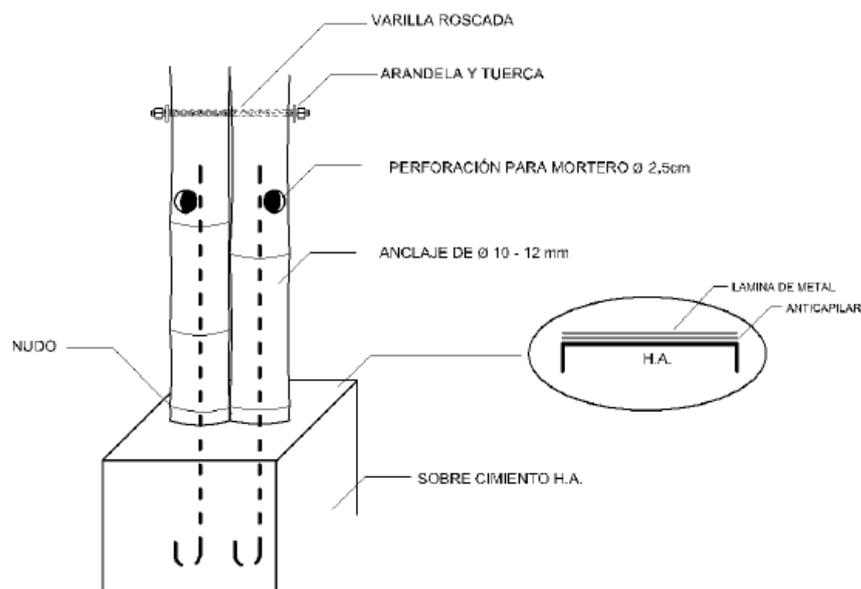


**Figura 6.16.** Anclaje de varias guadúas mediante varillas de acero (AIS, 2002).

### **Anclaje con varillas de acero internas**

En este tipo de anclaje, las varillas se inician en el cimiento y sobresalen en la cabeza del sobre cimiento, para cumplir las funciones de anclaje entre el sobre cimiento y los culmos (Figura 6.17) (MIDUVI, 2013).

Entre el sobre-cimiento y los culmos de GAK debe colocarse una lámina de metal o platina no superior a 3 mm de espesor (Figura 6.17), cubierta por una lámina anticapilar que evite que la humedad ingrese al culmo (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.17.** Anclaje con varillas de acero internas (MIDUVI, 2013).

El o los culmos deben apoyarse a 2 o 3 cm por abajo del nudo. Antes de introducir el o los culmos en las varillas, se debe eliminar el diafragma interior de los dos nudos inmediatos y extraer los restos del diafragma (MIDUVI, 2013).

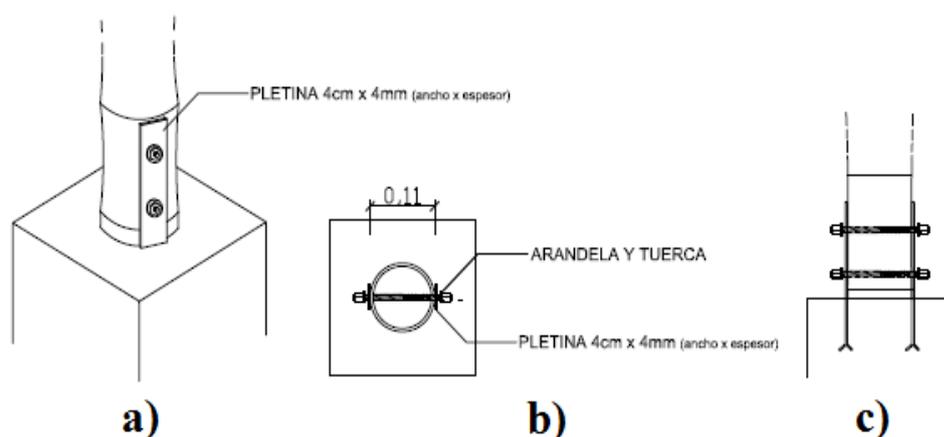
Los anclajes que sobresalen del zócalo o pedestal deben ser de 30 a 40 cm de longitud, mientras que la longitud del anclaje dentro del zócalo deberá ser de mínimo 40 cm. El diámetro de los anclajes que penetran en los culmos, está en función de la altura de las columnas, entre 10 y 18 mm (MIDUVI, 2013).

Con la sierra de copa o saca bocados, realizar una abertura de 2,5 cm de diámetro en el entrenudo del culmo a 30 cm del sobre-cimiento. No realizar el relleno del mortero o mezcla de arena-cemento, hasta que se hayan concluidos todos los soportes. Los componentes del mortero arena-cemento son de 1:2. La mezcla será más seca que fluida, pero que permita el deslizamiento por el agujero. Con un mazo, golpear el culmo para que el mortero penetre y se reparta de manera uniforme en su interior (MIDUVI, 2013).

### **Anclaje mediante pletinas de acero**

Este sistema permite asegurar uno o más culmos al sobre cimiento mediante pletinas de acero, para impedir que los pernos de las pletinas desgasten la GAK por efecto de corte, se introducen morteros o mezclas de arena-cemento al interior del culmo (MIDUVI, 2013).

Desde el sobre-cimiento deben sobresalir dos pletinas metálicas de 4 cm de ancho y 4 mm de espesor. Las dos pletinas pueden iniciar su anclaje desde el cimiento o desde el sobre-cimiento y sobresalir no menos de 25 cm de la cabeza del pedestal o zócalo. La separación entre las dos pletinas debe estar de acuerdo al diámetro de los culmos disponibles en Figura 6.18 (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.18.** Anclaje mediante pletinas de acero. a) Ejemplo de un anclaje con dos pletinas para un culmo de 11 cm de diámetro. b) Vista en planta c) Lateral (MIDUVI, 2013).

Las pletinas pueden estar previamente perforadas y atravesadas con dos pernos de 10 mm, debidamente asegurados con tuercas y anillos, mientras dure el fraguado del cimiento y sobre cimiento, para asegurar la alineación de las perforaciones en las dos pletinas (MIDUVI, 2013).

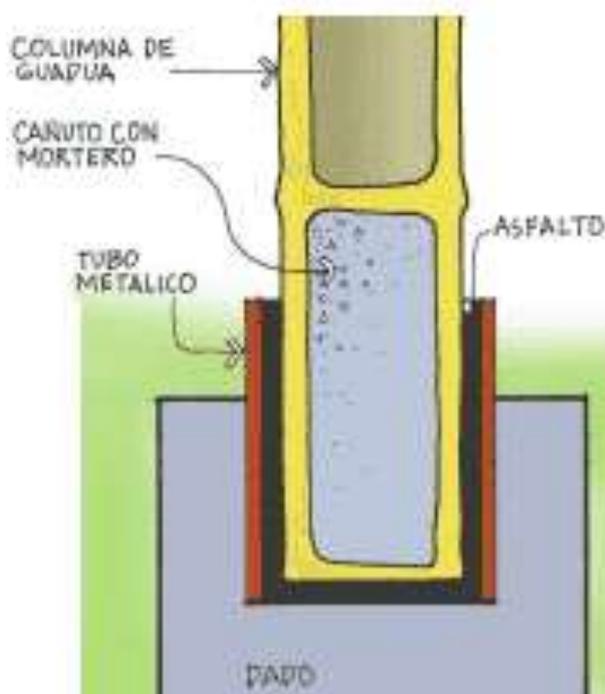
Concluido el fraguado, se extraen las tuercas, se coloca el culmo y se lo perfora en dirección de los agujeros de las dos pletinas. Se deberá pintar con anti-corrosivo las

pletinas, al igual que los elementos metálicos vistos: tuercas, anillos, extremos de los pernos (MIDUVI, 2013).

Con la sierra de copa o saca bocados, realizar una abertura de 2,5 cm de diámetro en el entrenudo del culmo a 30 cm del sobre-cimiento. Los componentes del mortero arena-cemento son de 1:2. La mezcla será más seca que fluida, pero que permita el deslizamiento por el agujero. Con un mazo, golpear el culmo para que el mortero penetre y se reparta de manera uniforme en su interior (MIDUVI, 2013).

### Anclaje empotrado o embebido

Un separador más eficiente para cortante es un tubo metálico o de acero dentro del cual se empotra la guadúa. El tubo, a su vez, se debe empotrar en el concreto del sobre-cimiento. El ligante y a su vez impermeabilizante entre la guadúa y el tubo debe ser asfalto, breá o una membrana bituminosa (Figura 6.19) (AIS, 2002).



**Figura 6.19.** Anclaje empotrado o embebido al sobre-cimiento (AIS, 2002).

## 6.9 UNIONES

Unir dos o más culmos (elementos cilíndricos) de diversas formas y diámetros, fueron retos que los primitivos humanos de las selvas tropicales enfrentaron con éxito. Cada uno de sus resultados debió ser producto del ciclo pragmático de ensayo - error - corrección, ciclo que repetido por decenas o cientos de años, permitieron excelentes e ingeniosos resultados (MIDUVI, 2013).

Todo elemento constituyente de una unión debe diseñarse para que no falle por tensión perpendicular a la fibra y corte paralelo a la fibra. En el caso de usar cortes especiales en la guadúa se deben tomar las medidas necesarias para evitar que estos induzcan la falla de la unión (NSR-10 R. C., 2010). Por ningún motivo se permitirán uniones clavadas, ya que los clavos inducen grietas longitudinales debido a la disposición de las fibras de la guadúa (NSR-10 R. C., 2010).

### 6.9.1 Tipos de cortes

Para conseguir uniones adecuadas se debe empezar por realizar un encaje perfecto entre las guadúas, para lo cual debemos realizar los cortes típicos en estructuras de GAK (MIDUVI, 2013).

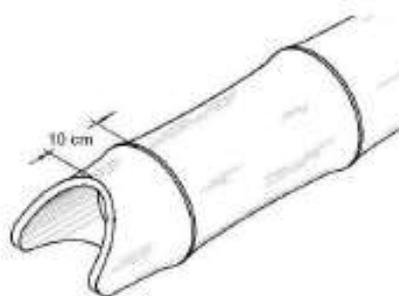
La mayoría de las uniones parten de tres tipos de cortes o entalladuras.

- **Corte recto:** corte plano y perpendicular al eje del culmo (MIDUVI, 2013):



**Figura 6.20.** Corte recto (NSR-10 R. C., 2010).

- **Corte boca de pez:** cóncavo transversal al eje del culmo, generalmente se utiliza para acoplar dos elementos de guadúa (NSR-10 R. C., 2010):

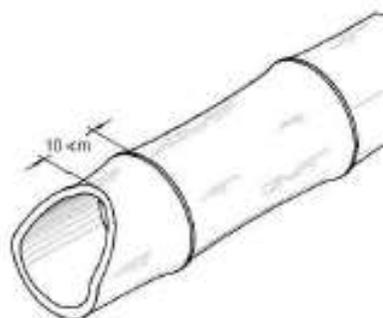


**Figura 6.21.** Corte boca de pez (NSR-10 R. C., 2010).



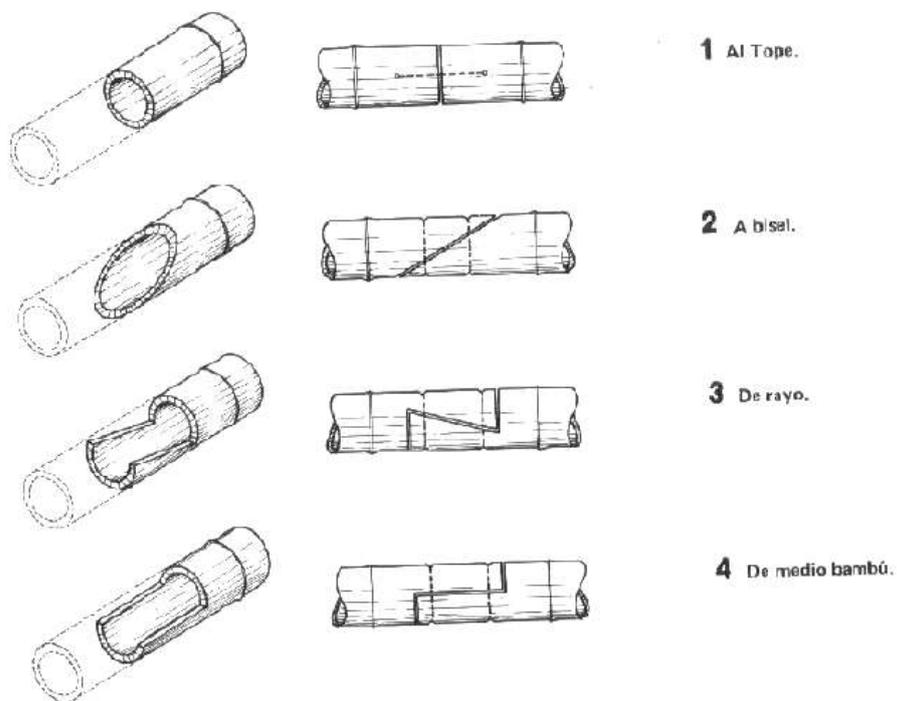
**Figura 6.22.** Corte boca de pez (Stamm, 2010).

- **Corte pico de flauta:** Este corte se utiliza para acoplar guadúas que llegan en ángulos diferentes a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , se puede hacer como una boca de pescado inclinado o con dos cortes rectos a diversos ángulos respecto al eje del culmo (NSR-10 R. C., 2010).



**Figura 6.23.** Corte pico de flauta (NSR-10 R. C., 2010).

En la Figura 6.24 se puede observar varios cortes incorrectos realizados en los culmos de la guadúa, bajo ningún concepto se los debe realizar, pues las uniones no soportarán los efectos de corte y tracción a los cuáles estará sometido el puente peatonal de GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.24.** Cortes incorrectos en la GAK (FUNDEGUADUA A. , 2010).

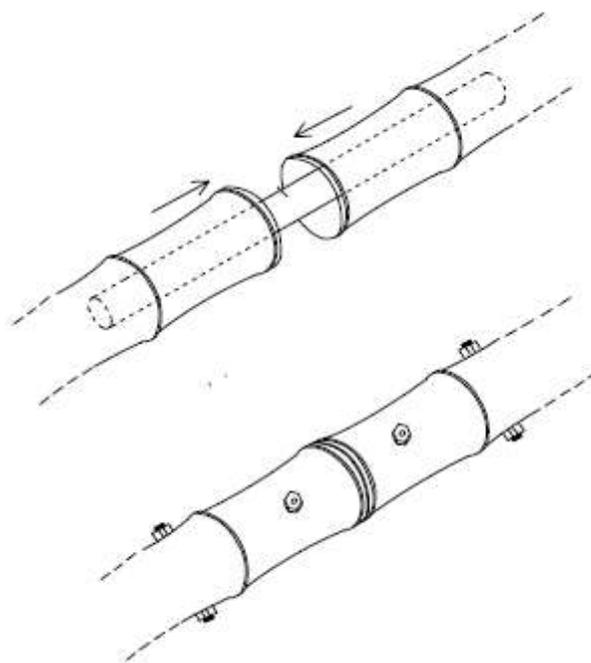
## 6.9.2 Uniones diversas

Las diversas posiciones que pueden tomar columnas, vigas, tabiques, estructuras portantes de cubierta y en general todo detalle producto de la creatividad del diseñador, impiden dar recetas para ubicar las uniones “más adecuadas” puesto que cada una de aquellas, responde a situaciones diferentes. Sin embargo existen uniones más comunes que otras, motivo por el cual en el presente manual se destacan algunos ejemplos, donde se detallan recomendaciones para su fabricación (MIDUVI, 2013).

### 6.9.3 Uniones longitudinales

Las uniones longitudinales o también llamadas a tope (Figura 6.25), se realizan cuando se requiere aumentar la longitud de los culmos, manteniendo la conicidad. Ello significa asegurar un conjunto de culmos cuyo eje longitudinal sea común (MIDUVI, 2013).

La unión se realiza seleccionando culmos que tengan el mismo diámetro, con una tolerancia de 0.5 mm. El corte plano de cada culmo se realiza a 2 cm sobre sus respectivo nudos extremos (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.25.** Unión longitudinal (MIDUVI, 2013).

Se deben despojar los tabiques o diafragmas interiores de los 2 nudos vecinos en cada extremo de cada culmo. Luego se inserta una varilla de acero corrugada de 12 mm (1/2 pulgada) con sus respectivas tuercas y arandelas en los extremos de cada culmo a unir. Hay que introducir en el sitio de unión un mortero de arena-cemento 1:2 (Figura 6.26) que permita mantener fija la varilla de acero corrugado y que evite los potenciales aplastamientos que se puedan generar en la unión de los dos culmos (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.26.** Relleno con mortero 1:2 para uniones longitudinales (FUNDEGUADUA A. , 2010).

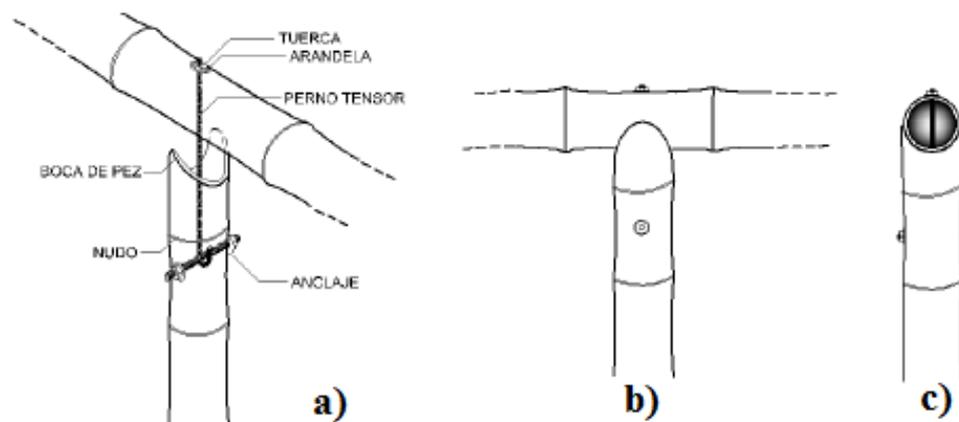
Previo a la introducción del mortero, hay que mantener firme la unión de los nudos, mediante un torniquete. Realizado el fraguado del mortero o asegurados los pernos, se retira el torniquete (MIDUVI, 2013).

#### **6.9.4 Uniones de boca de pez**

Son innumerables las soluciones que permiten asegurar un culmo con boca de pez a otro culmo de manera que se mantenga la perpendicularidad entre sus eje (Lucker, 2010). Existen dos clases de aseguramiento:

### Unión boca de pez mediante perno tensor y anclaje

Realizada la boca de pez en el extremo de un culmo y preparada aquella para acoplarse a otro culmo en sentido ortogonal, el culmo que tiene la boca de pez es despojado de su diafragma inmediato interior, cuyo despojos son extraídos. En el culmo que tiene la boca de pez, se introduce una varilla roscada de 10 mm, a 3 o 4 cm por debajo del nudo, la misma que se asegura mediante arandelas y tuercas (Figura 6.27). Lo denominamos perno de anclaje (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.27.** Unión boca de pez mediante perno tensor y anclaje. a) Partes de la unión boca de pez. b) Vista lateral. c) Vista frontal (MIDUVI, 2013).

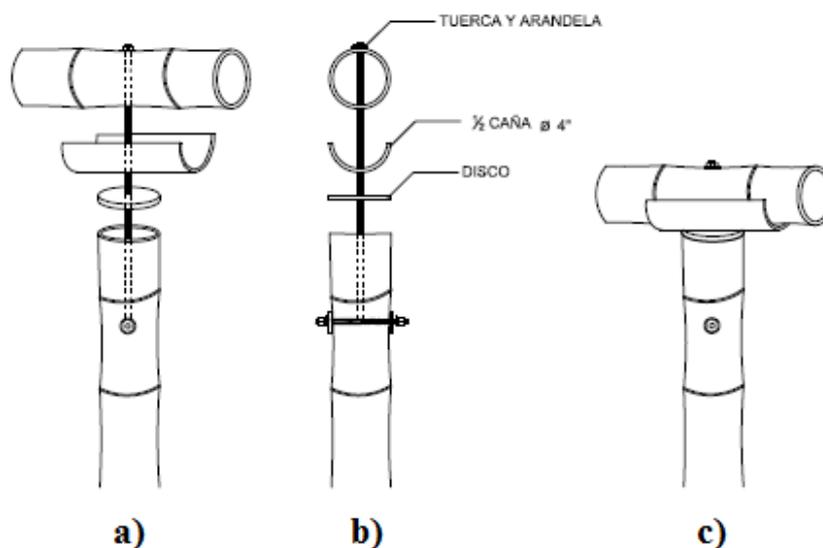
En el culmo a acoplarse, se realiza una perforación transversal, de manera perpendicular a sus fibras y que atraviese el culmo. Se prepara un perno, llamado tensor, que en un extremo tenga un gancho y en el otro el hilo o rosca para la tuerca. Se verifica que este perno tensor tenga una medida tal que, alcance con su gancho el perno de anclaje y que el otro extremo sobresalga por la superficie del culmo ortogonal (MIDUVI, 2013). Finalmente, se engancha el perno tensor al perno de anclaje y se

introduce su otro extremo por las perforaciones realizadas en el culmo de acople, hasta asegurar con arandela y tuerca, el extremo mencionado (MIDUVI, 2013).

### Unión boca de pez mediante disco y media caña metálica

El procedimiento es similar al anterior, salvo las siguientes innovaciones:

- Se realiza un corte plano en el culmo receptor y, en lugar de la boca de pez, se ubica un disco metálico de 2 mm de espesor con perforación central de 10 mm y sobre él, una media caña metálica de 15 cm de longitud, con perforación de 10 mm y proveniente de un tubo metálico de 4 pulgadas y 2 mm de espesor (Figura 6.28) (MIDUVI, 2013).
- El disco debe tener el diámetro previsto en función de los culmos disponibles, 10, 11, 12, 13 cm, y las medias cañas metálicas se acoplaran de igual manera a los culmos, ya sea abriendo o cerrando los lados de la media caña (MIDUVI, 2013).
- La colocación y aseguramiento del perno de anclaje y del perno tensor es igual a lo expuesto en la unión boca de pez mediante perno tensor y anclaje (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.28.** Unión boca de pez mediante disco y media caña metálica. a) Componentes de la unión. b) Vista frontal. c) Vista lateral (MIDUVI, 2013).

Este tipo de unión tiene algunas ventajas como:

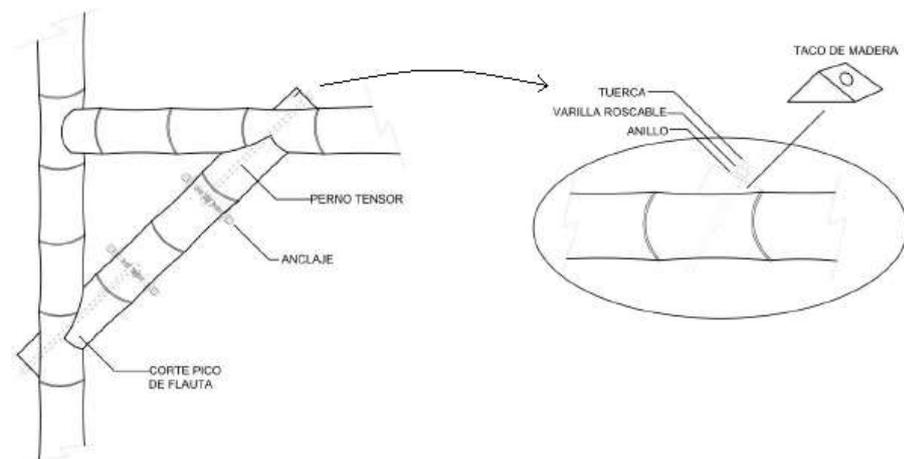
- Se reduce el tiempo que demanda la realización de la boca de pez y no demanda mano de obra especializada.
- Es más efectiva la transmisión de cargas por medio del disco que abarca todo el corte plano del culmo receptor (MIDUVI, 2013).

Pero también tiene desventajas como:

- Costo de las piezas metálicas.
- Se requiere prever con anticipación los discos y medias cañas, perforados y pintados con anticorrosivos (MIDUVI, 2013).

### **6.9.5 Uniones en diagonal**

La unión en diagonal usando el corte pico de flauta, se utiliza para reforzar el enlace entre dos culmos perpendiculares entre sí (Figura 6.29). El acople del corte pico de flauta con culmos verticales u horizontales, según sea el caso, debe provocar un perfecto ajuste de los dos elementos, ajuste que corresponde de manera exclusiva a la entalladura denominada pico de flauta (MIDUVI, 2013).



**Figura 6.29.** Uniones en diagonal (MIDUVI, 2013).

La unión en diagonal posibilita ser asegurada de dos maneras: colocando un perno tensor y uno de anclaje y/o colocando una varilla roscada en el ángulo que forma el culmo con la pieza en diagonal (MIDUVI, 2013).

La colocación de pernos en diagonal provoca que las tuercas y arandelas o anillos, no queden perpendiculares a las fibras, motivo por el cual, si se ajustan en demasía, uno de los bordes de la tuercas y anillos lastiman y rompan las fibras del bambú. Para evitar esta circunstancia es preferible preparar pequeños prismas de madera dura que permita su colocación entre el culmo y el anillo y tuerca, lo que permitirá un ajuste perpendicular a las fibras y evitará su lastimadura (MIDUVI, 2013).

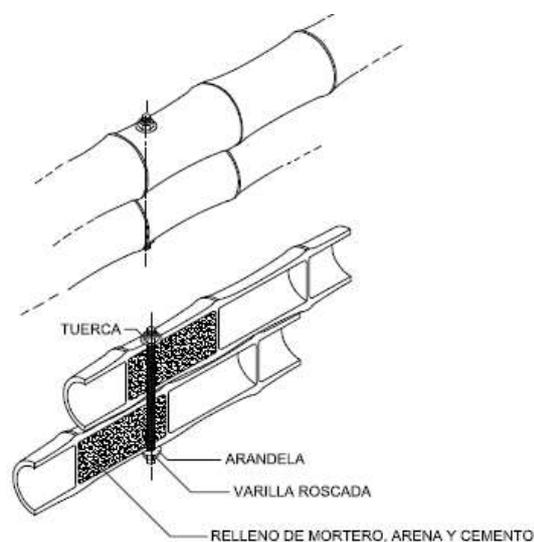
## 6.10 VIGAS COMPUESTAS

La unión longitudinal de dos o más culmos permite a su vez la construcción de vigas compuestas de mayor peralte mediante dos o tres piezas longitudinalmente acopladas. Se debe preparar la unión longitudinal de dos o más culmos en la longitud requerida por la obra (MIDUVI, 2013).

La siguiente pieza con uniones longitudinales y que se colocará sobre la anterior para proporcionar mayor peralte, deberá tener la misma longitud que la anterior, pero las uniones entre los culmos no deben coincidir con las uniones de la pieza inferior,

por lo que, se hace necesaria una presentación previa entre las dos piezas (MIDUVI, 2013).

Realizada la primera y segunda pieza, se procederá a la unión de las dos, no sin antes sujetar mediante amarres provisionales o pequeñas cajas inmovilizadoras, que permitan la perforación continua y la introducción de los respectivos pernos y aseguramiento con las tuercas (Figura 6.30) (MIDUVI, 2013).

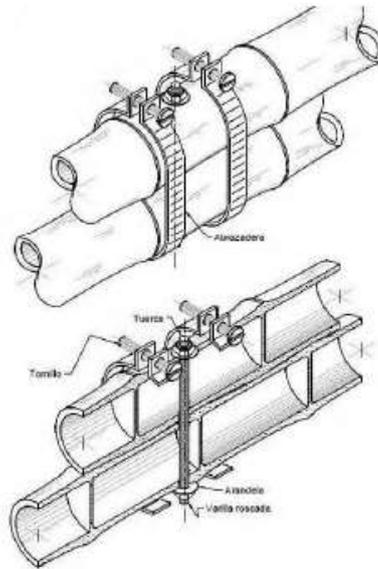


**Figura 6.30.** Viga compuesta formada por dos canutos unidos por un perno metálico (MIDUVI, 2013).

Los pernos usados en las conexiones apernadas deben ser de acero estructural con esfuerzo de fluencia no menor de 240 MPa; el diámetro mínimo permitido para los pernos es de 10 mm y ubicados a 3 cm de los nudos. Todos los elementos metálicos usados en uniones apernadas para formar vigas compuestas, que estarán expuestas a condiciones ambientales desfavorables deben tener algún tipo de tratamiento anticorrosivo. (NSR-10 R. C., 2010).

Es recomendable el uso de zunchos metálicos como complemento (Figura 6.31) dentro del diseño de las conexiones, siempre y cuando se tomen las precauciones pertinentes para evitar el aplastamiento y la falla por compresión perpendicular a la

fibra en elementos individuales, así como la separación y el deslizamiento entre elementos conectados (NSR-10 R. C., 2010).



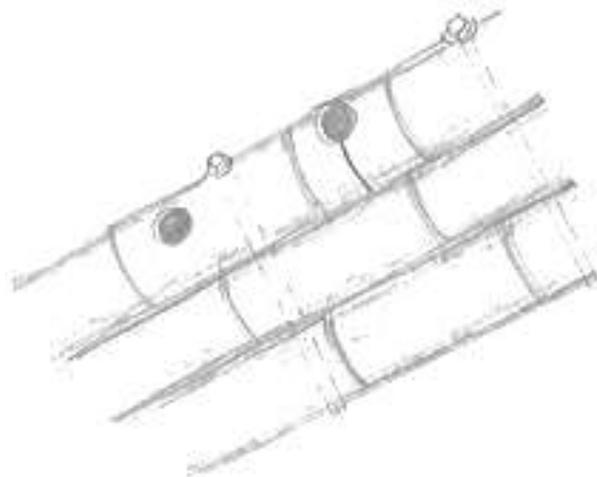
**Figura 6.31.** Viga compuesta formada por dos canutos unidos mediante un perno metálico y zunchos (MIDUVI, 2013).

Las uniones en las cuales los culmos de guadúa estén sometidos a cargas de aplastamiento, se hace necesario rellenar los entrenudos adyacentes a la unión y por donde pasen pernos con una mezcla de mortero de cemento en relación 1:2 (Figura 6.32), preferiblemente con un aditivo plastificante que garantice la fluidez de la mezcla (Stamm, 2010).



**Figura 6.32.** Relleno con mortero 1:2 para formar una viga compuesta (FUNDEGUADUA A. , 2010).

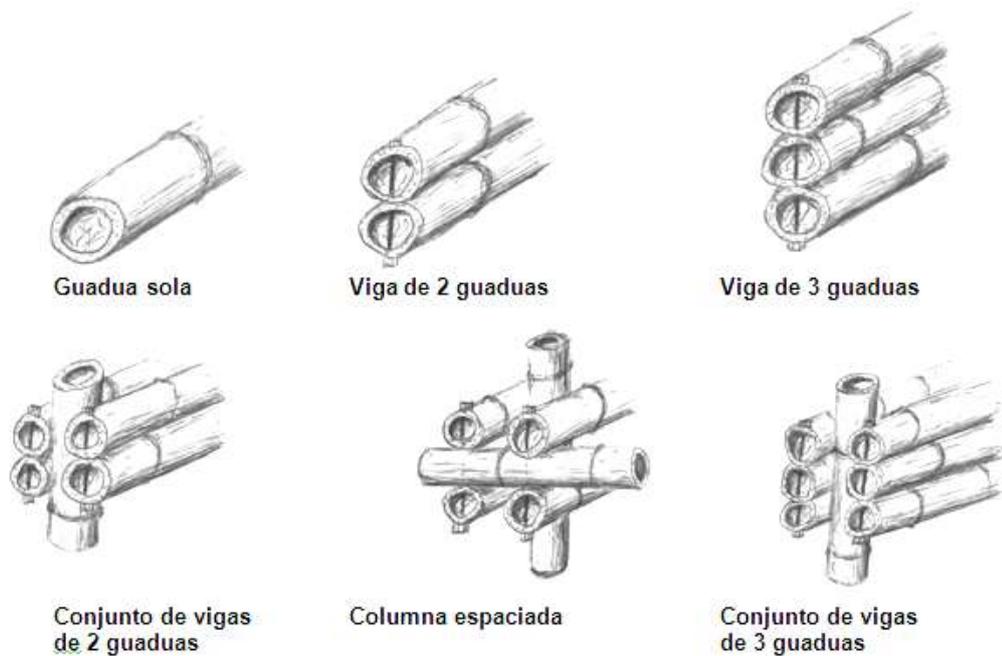
Las perforaciones hechas para el relleno de los entrenudos deben tener un diámetro máximo de 26 mm (Figura 6.33), y deben ser debidamente tapadas con el mismo mortero de relleno, para que se garantice la continuidad estructural del elemento (NSR-10 R. C., 2010).



**Figura 6.33.** Perforaciones para el relleno de los entrenudos (Stamm, 2010).

Mediante la utilización de pernos metálicos y los diferentes tipos de uniones vistos en la sección anterior, se pueden formar vigas compuestas con diferentes

configuraciones, dependiendo de la arquitectura y del diseño de la construcción (Stamm, 2010), como se observa en la Figura 6.34.



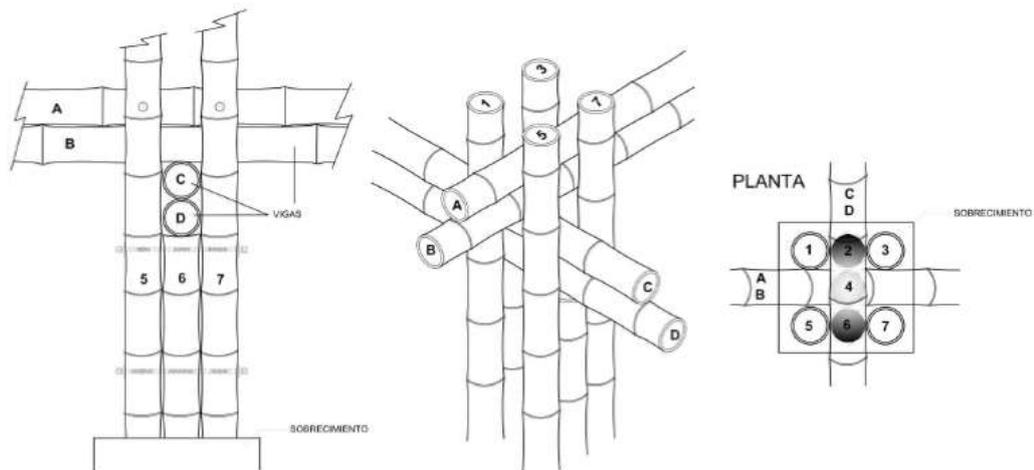
**Figura 6.34.** Diferentes configuraciones de los culmos para formar vigas compuestas (Stamm, 2010).

## 6.11 CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS

La altura de las columnas y la carga axial a soportar, demanda el análisis estructural de la esbeltez de aquellas, para contrarrestar posibles flexiones o pandeos de las mismas. Un procedimiento para disminuir la esbeltez de las columnas es aumentar la sección de las mismas con adición de dos o más culmos que eviten las posibles flexiones laterales o pandeos (MIDUVI, 2013).

En el caso de aumentar culmos a la sección de la columna es necesario, unir aquellos mediante pernos que sujeten en diversos niveles a los culmos, de la misma manera que la unión de culmos para formar vigas compuestas (MIDUVI, 2013).

La adición de culmos con alturas diferenciadas, permite asegurar vigas superiores transversales, sean éstas dobles o triples, evitando la flexión lateral de aquellas. Ejemplo de columna compuesta por 5 culmos y que soportan vigas dobles transversales (Figura 6.35) (MIDUVI, 2013).

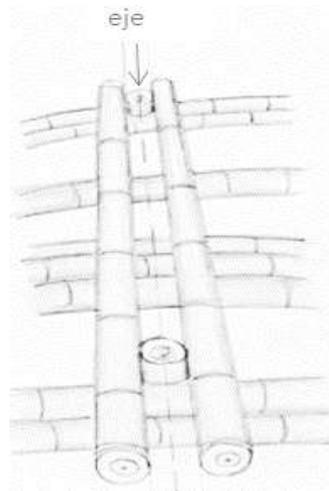


**Figura 6.35.** Columna compuesta por 5 culmos y que soportan vigas dobles transversales (MIDUVI, 2013).

### Columnas principales

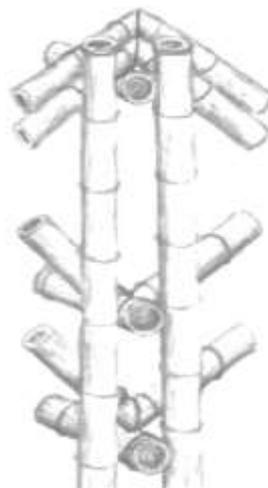
Después de armados los arcos y colocadas las diagonales, se colocan las columnas (Figura 6.36). Las guadúas para éstos deben ser cilíndricas, gruesas y rectas (Stamm, 2010).

Como los culmos se prolongan logarítmicamente, es conveniente tomar la medida para obtener la longitud necesaria de las columnas, cuidando que corresponda siempre en los sitios cercanos a los nudos (de 1'' a 3''). Así se asegura que la terminación de la guadúa esté siempre protegida del aplastamiento (Stamm, 2010).



**Figura 6.36.** Columna principal formada por dos culmos (Stamm, 2010).

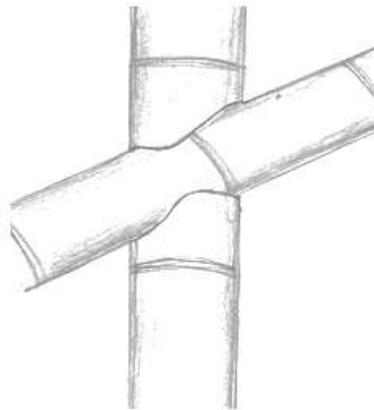
La distancia entre una columna y otra depende del diseño del puente peatonal de GAK, así como el número de culmos por columna. Se puede colocar columnas conformadas por dos culmos cada 5 m, dejando como separación entre los culmos, la medida del diámetro de los mismos. Estos postes se colocan repartidos, dejando que sobresalgan arriba y abajo, un poco del eje. Los postes de los extremos son más largos en la parte inferior para que puedan entrar bien en el estribo (Stamm, 2010).



**Figura 6.37.** Columnas espaciadas (Stamm, 2000).

### **Columnas auxiliares**

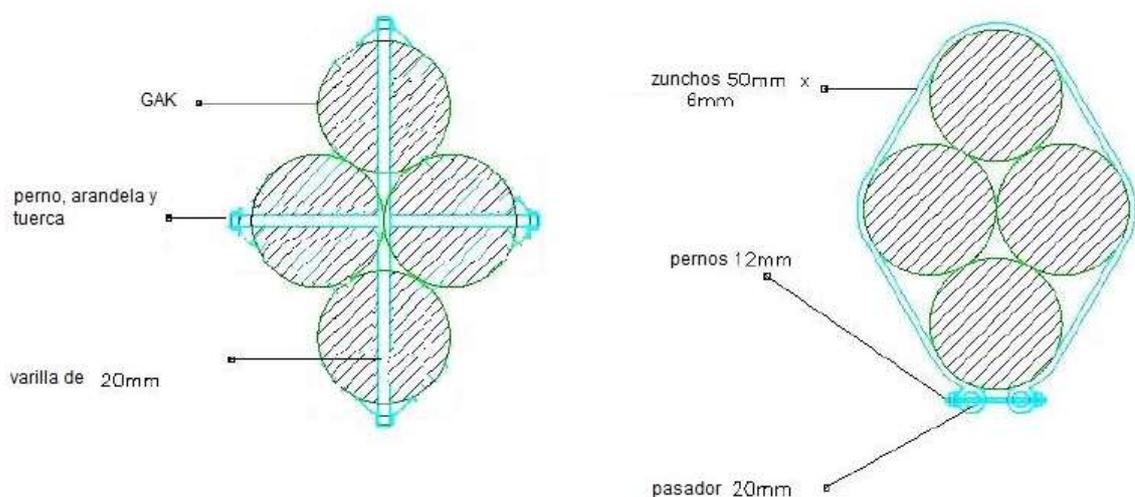
Van ubicados en el centro del espacio que hay entre dos ejes (por ejemplo a 2.50 m del eje), de forma que encajen perfectamente con las diagonales. Por lo tanto, es necesario realizar un corte en forma de boca de pez, según el caso (Figura 6.38) (NSR-10 R. C., 2010).



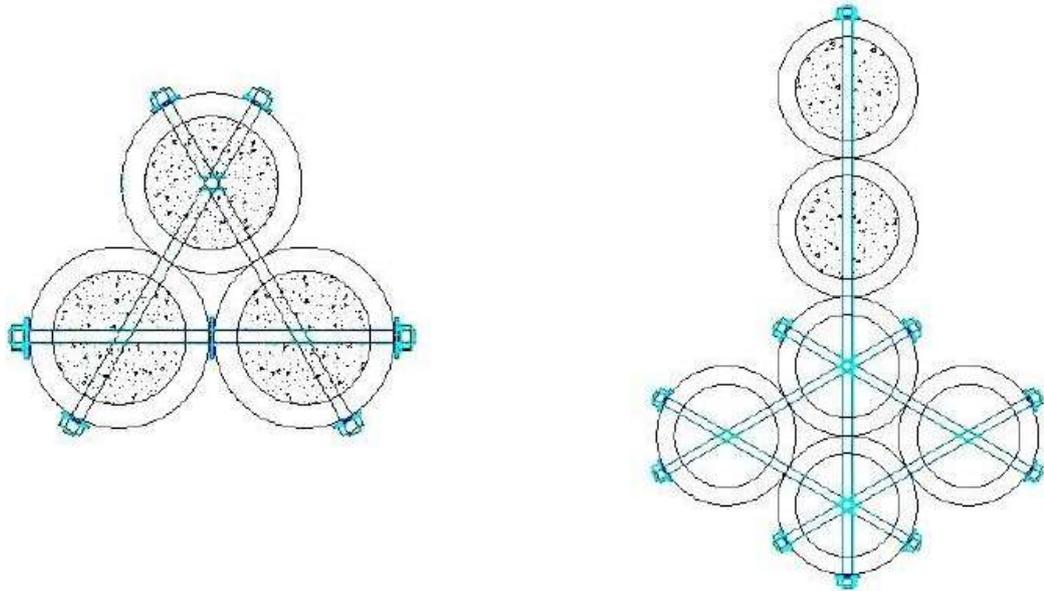
**Figura 6.38.** Columna auxiliar (Stamm, 2000).

### Reforzamiento en columnas

Existen varias opciones de reforzamiento, con varillas, pernos y zunchos. La configuración y su uso dependen del arquitecto encargado del proyecto, y la habilidad de los carpinteros que trabajen en el proyecto (Figuras 6.39 y 6.40) (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.39.** Reforzamiento de columnas con pernos (izquierda) y varillas (derecha)  
(FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.40.** Configuraciones de los culmos para las columnas (FUNDEGUADUA A. ,  
2010).

De la misma manera, se deberá rellenar con mortero 1:2 los entrenudos adyacentes a las uniones en la columna y por donde pasen pernos (Lucker, 2010).

## 6.12 CERCHA

Tradicionalmente, la construcción de la cercha implicaba la instalación “guadúa por guadúa” sobre un andamio. Actualmente, se aplican las técnicas de carpintería europea para la instalación del puente peatonal de GAK, el cual consiste en primero, la prefabricación de la cercha en el suelo cerca de la construcción, y segundo, el montaje del mismo en los sobre-cimientos (Stamm, 2000).

La carpintería europea tiene como principal diferencia la prefabricación en el suelo (Figura 6.41). Por razones de precisión se dibuja un croquis de cada pared en el piso y se trabaja exactamente sobre él. Para la construcción de un puente peatonal de GAK se necesita gran precisión por lo que el trabajo en el piso es más seguro. Además, la

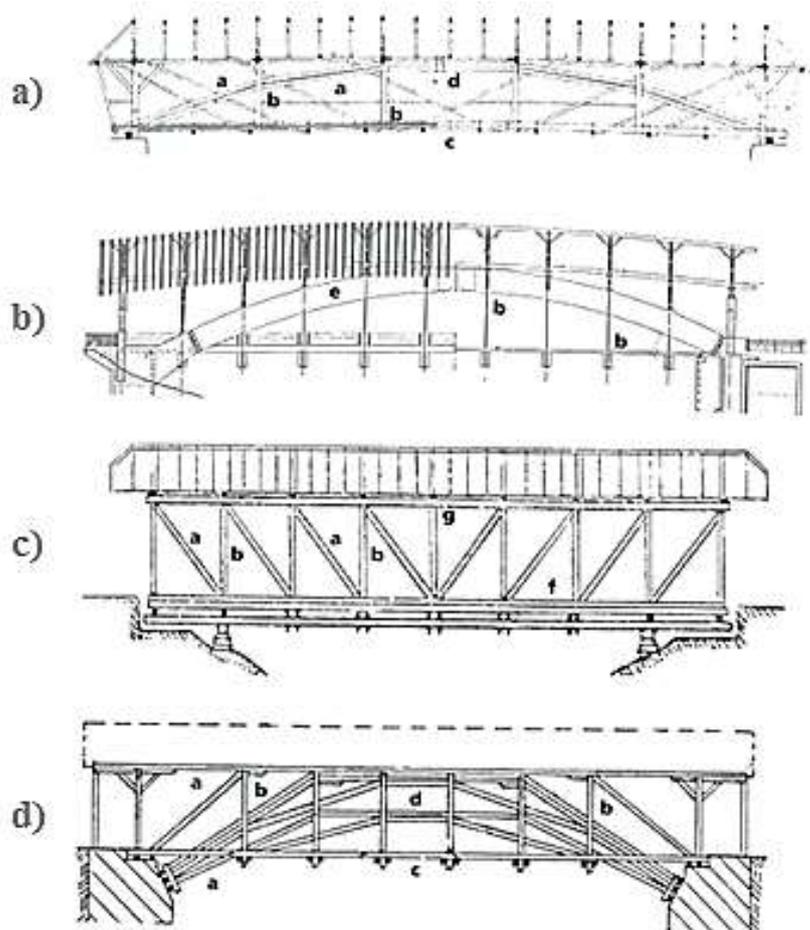
instalación se ejecuta con más rapidez, requiriendo menos tiempo de trabajo en altura (Stamm, 2010).



**Figura 6.41.** Prefabricación de una cercha para puente peatonal de GAK (Stamm, 2010).

Toda la cercha prefabricada es numerada, rayando la guadúa con machete o sierra, en código romano. Cada constructor puede numerar sus culmos como prefiera, lo importante es una fácil orientación de su cuadrilla de obreros en poco tiempo (Stamm, 2000).

La disposición y funcionamiento de los elementos internos de la cercha dependerá de la luz, solicitudes y requerimientos propios de cada proyecto. Los tipos más comunes de cerchas son en polígono, combinado, viga cargadora y arcos (Stamm, 2000), como se observa en la figura 6.42:



**Figura 6.42.** a) Combinado. b) Viga cargadora. c) Polígono. d) Arcos (Stamm, 2000).

### Cercha con vigas cargadoras

Como su nombre lo indica, el elemento principal de soporte son las vigas cargadoras (Figura 6.43), aprovechando la curvatura natural de los culmos de guadúa se pueden obtener vigas compuestas formadas por un conjunto de culmos curvos (Figura 6.44). Este método es el más recomendado para luces de 20 m a 50 m debido a la contraflecha generada por las guadúas, mientras la viga gana altura estática, su capacidad cortante aumenta (Stamm, 2000).



**Figura 6.43.** Prefabricación de una cercha con vigas cargadoras (Stamm, 2000).



**Figura 6.44.** Curvatura natural de los culmos de guadúa para formar cerchas con vigas cargadoras (Stamm, 2000).

Las vigas cargadoras son sistemas muy poderosos para cargas bien distribuidas. Su principal debilidad son las cargas puntuales, ya que inducen que la línea de momentos salga de la sección de la viga y genere deformaciones peligrosas (Stamm, 2010).

La altura de una viga influye proporcionalmente a la curva de los momentos. La parte baja de una viga trabaja a tensión, la parte superior a compresión. Estas fuerzas se pueden dividir, y obtener un arco a compresión o la catenaria a tensión. Divididos ya no se neutralizan los momentos y se generan reacciones laterales, sea compresión o tracción, que deben ser absorbidos por los estribos. Cuanto más bajo y largo el arco,

más fuerte las reacciones en los estribos y más grandes los esfuerzos internos (Stamm, 2010).

### **Prefabricación de la cercha**

Las técnicas vistas en las secciones anteriores sobre uniones y sus tipos, vigas compuestas y columnas, son utilizadas en la prefabricación de cerchas (Figura 6.45). Para unir la viga inferior o de piso con la viga de carga principal (Figura 6.46 y 6.47), en el extremo se debe hacer el corte longitudinal de empalme, con mucha precisión, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación necesario, con el fin de reducir la cantidad de guadúas al ancho diseñado en el estribo y para lograr una presentación agradable (Stamm, 2000).



**Figura 6.45.** Prefabricación de una cercha, se observan uniones, vigas compuestas y columnas (Stamm, 2000).



**Figura 6.46.** Unión de una viga inferior con un viga de carga principal (Stamm, 2000).



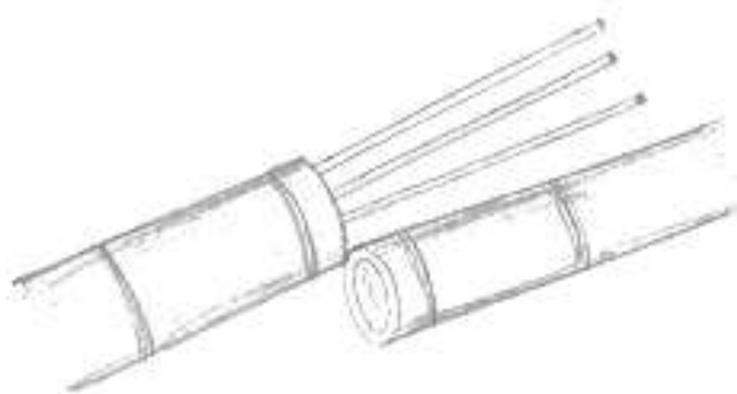
**Figura 6.47.** Unión de una viga inferior con un viga de carga principal (Stamm, 2010).

### **Prefabricación de la cercha: Barandales**

En la viga del barandal, la cual soporta algo de carga, las guadúas no pueden ser demasiado delgadas, pero se espera que sean largas. Es conveniente comenzar a armar esta viga desde el centro e ir hacia los extremos, haciendo las respectivas uniones. Es recomendable introducir tres varillas en la unión del centro del barandal a la viga inferior (Figura 6.48 y 6.49) (Stamm, 2000).



**Figura 6.48.** Prefabricación de barandales (Stamm, 2000).



**Figura 6.49.** Unión del centro del barandal mediante tres varillas (Stamm, 2000).

### **Prefabricación de la cercha: Diagonales**

Para colocar las diagonales es necesario hacer muy bien los cortes de empate, cuidando que queden perfectamente encajados dentro de las respectivas vigas (Figuras 6.50 y 6.51). Para esto se coloca la guadúa que se va a cortar, encima del arco y se traza con el ángulo necesario (Stamm, 2010).



**Figura 6.50.** Unión de diagonales a vigas cargadoras (Stamm, 2010).



**Figura 6.51.** Unión de diagonales a vigas cargadoras (Stamm, 2010).

### **Prefabricación de la cercha: Integración de vigas cargadoras**

Cuando se termina de armar la cercha con sus respectivas diagonales, columnas principales y columnas auxiliares, se procede a colocar (en forma de sánduche, Figura 6.52), las vigas de piso, de carga y de techo para la cara exterior de la cercha, de modo que correspondan exactamente con los de la cara interior. Para lograr esto, se suben

las varillas de guía, unos 15 o 20 cm con el fin de poder apoyar los nuevos arcos (Stamm, 2000).



**Figura 6.52.** Colocación de las vigas de piso, de carga y de techo en forma de sánduche (Stamm, 2000).

Además de los tornillos que atraviesan cada uno de los arcos, se deben colocar tornillos perpendiculares, en los puntos que coincidan con diagonales y postes para fijar ambas cerchas entre sí. Una vez completada la cercha se corre a un sitio que puede ser cerca de los estribos o a un lado de donde se prefabricó. Se recuperan las guadúas del replanteo, colocándolas de forma invertida y se repite la misma secuencia hasta completar la otra cercha (Stamm, 2000).

### **Montaje o izada de la cercha**

Para el montaje de la cercha, ésta deberá ser colocada en una posición adecuada que permita su levantamiento mediante una grúa hidráulica, la cual montará la cercha y deberá acoplarla perfectamente a los sobre-cimientos mediante la técnica de anclaje vista en las secciones anteriores (Stamm, 2000). A continuación, se observan varias figuras del proceso de montaje de la cercha:



**Figura 6.53.** Colocación de la cercha para el levantamiento mediante grúa (Stamm, 2000).



**Figura 6.54.** Aseguramiento de la grúa a la cercha (Stamm, 2000).



**Figura 6.55.** Levantamiento de la cercha mediante la grúa (Stamm, 2000).



**Figura 6.56.** Montaje de la cercha (Stamm, 2000).



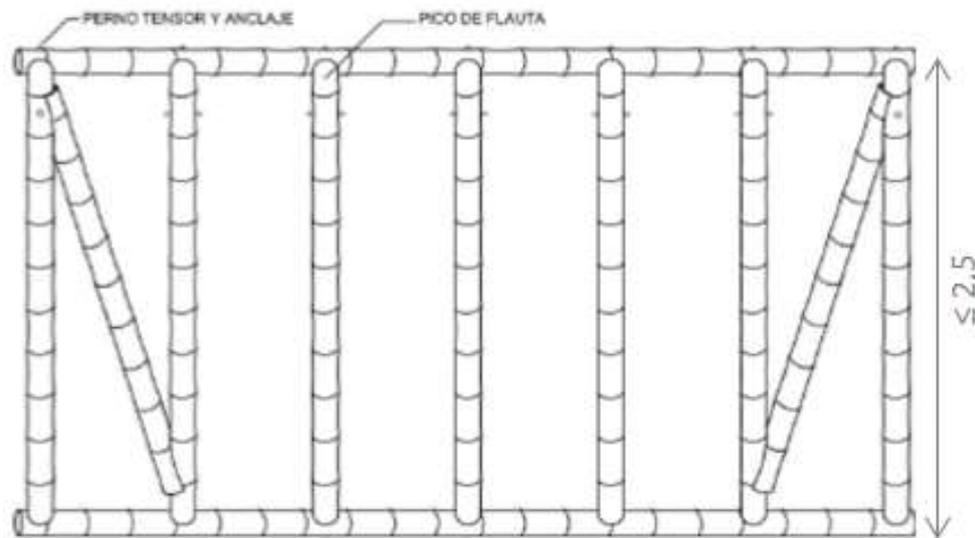
**Figura 6.57.** Montaje de la cercha (Stamm, 2000).

### **6.13 PISOS CON ESTRUCTURA DE CULMOS DE GAK**

#### **Construcción de la estructura de soporte**

La construcción de pisos se puede realizar mediante la utilización de culmos de GAK, y su estructura depende del diseño del puente. Se recomienda elaborar pisos con máximo 2,5 m de longitud entre las viguetas principales de piso, por el peso del mismo, que hará difícil su manipulación y puesta en obra. Los culmos intermedios y los laterales, serán asegurados a los culmos de la solera superior e inferior, mediante la unión boca de pez y asegurados con pernos de anclaje y tensores (Figura 6.58) (Stamm, 2010).

Los culmos intermedios o secundarios se colocaran espaciados a no más de 0.6 m dependiendo del ancho del puente. En cada uno de los espacios extremos, se debe colocar un culmo en diagonal para dar rigidez al piso. Estos dos culmos deben ser asegurados con la unión pico de flauta (Figura 6.58). Si el panel va a ser ubicado sobre un zócalo o sobre cimiento, habrá que descontar, la altura de éstos elementos (Stamm, 2010).



**Figura 6.58.** Piso con estructura de GAK (MIDUVI, 2013).

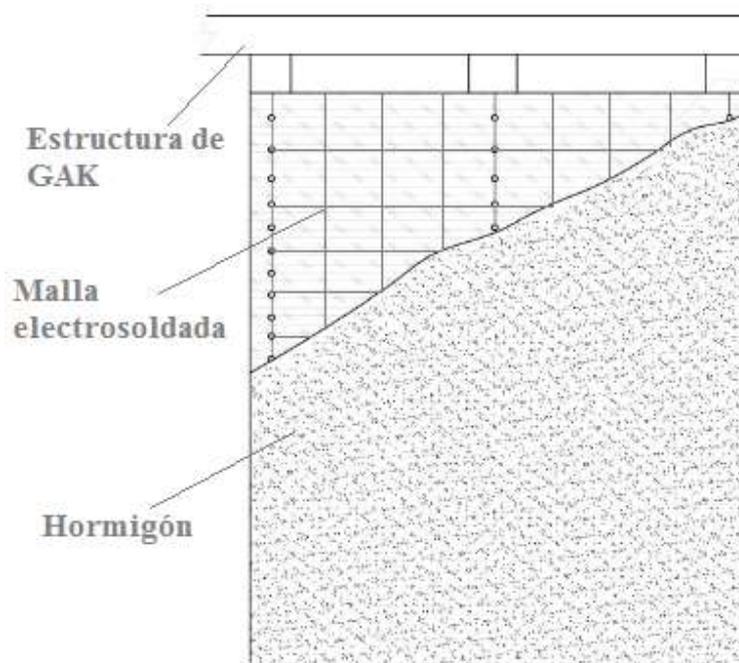
### Acabados para el piso

La estructura de soporte puede ser recubierta con: loseta de hormigón, latillas extraídas de los culmos de GAK y entablado de madera:

- **Loseta de hormigón**

Se coloca encofrado y se funde el piso con hormigón 1:2:3 añadiendo una malla electrosoldada para minimizar las grietas por dilataciones y garantizar una estabilidad lateral. Se recomienda curar el hormigón con las técnicas convencionales de curado.

La altura de la loseta no deberá ser mayor a 5 cm (Figura 6.59) (NEC-11, 2014).



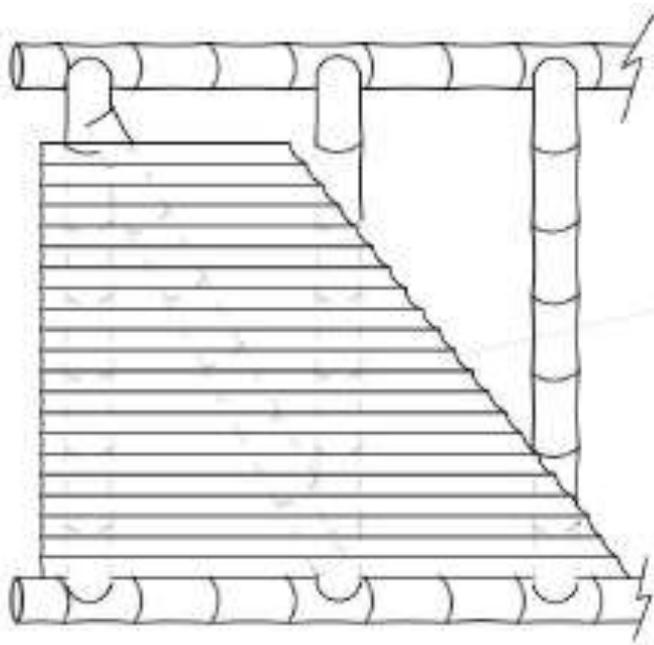
**Figura 6.59.** Loseta de hormigón con malla electrosoldada (NEC-11, 2013).



**Figura 6.60.** Loseta de hormigón con malla electrosoldada, puente Santa Fé (Stamm, 2010).

- **Latillas de culmos de GAK**

Las latillas deben estar secas y preservadas, de anchos y espesores uniformes y cantos rectos. Se colocarán con su epidermis hacia el exterior. Pueden asegurarse de manera ortogonal a la estructura de apoyo. Otra forma de asegurarlos es en diagonales o formando figuras geométricas (Figura 6.61). Para asegurar las latillas a la estructura de culmos, se utilizan clavos de 1 ½ pulgada, enlazados por alambre galvanizado No 18. Este alambre puede ser recubierto posteriormente con latillas del culmo de GAK (Figura 6.62). Para no provocar fisuras en las latillas, antes del clavado se recomienda realizar en la epidermis de la latilla, una pequeña incisión en forma de cruz (NEC-11, 2013).



**Figura 6.61.** Latillas de culmos de GAK para acabados del piso (NEC-11, 2013).

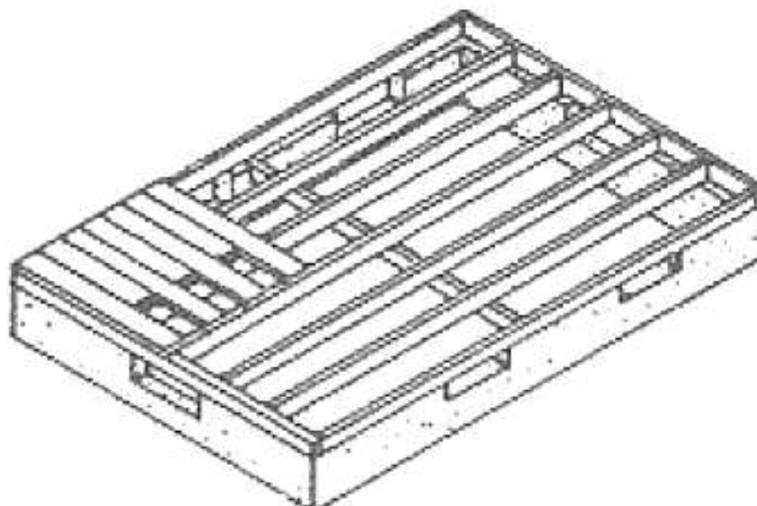


**Figura 6.62.** Latillas de culmos de GAK, puente Bogotá (Stamm, 2010).

Las latillas de culmos de GAK se aseguran entre sí mediante pernos o clavos. El aseguramiento en el sobre cimientto se realiza mediante varillas roscadas dejadas previamente en la riostra o viga de sobre cimientto. Presentados los pisos ante la riostra de sobre-cimientto se marcan los sitios donde se hallan las varillas roscadas. Se perforan las soleras de culmos de GAK. Se ubican las varillas roscadas en las perforaciones y se aseguran con anillos y tuercas (NEC-11, 2013).

- **Entablado de madera**

Existen varias alternativas de madera, el cual dependerá del presupuesto establecido para el proyecto (Figura 6.63). Por lo general, las tablas se colocarán en sentido transversal al puente, o en el sentido de las luces más cortas (Figura 6.64) (NEC-11, Capítulo VII, 2013).



**Figura 6.63.** Entablado de madera (Grupo Andino, 1984).



**Figura 6.64.** Entablado de madera, Puente Bogotá (FUNDEGUADUA A. , 2010).

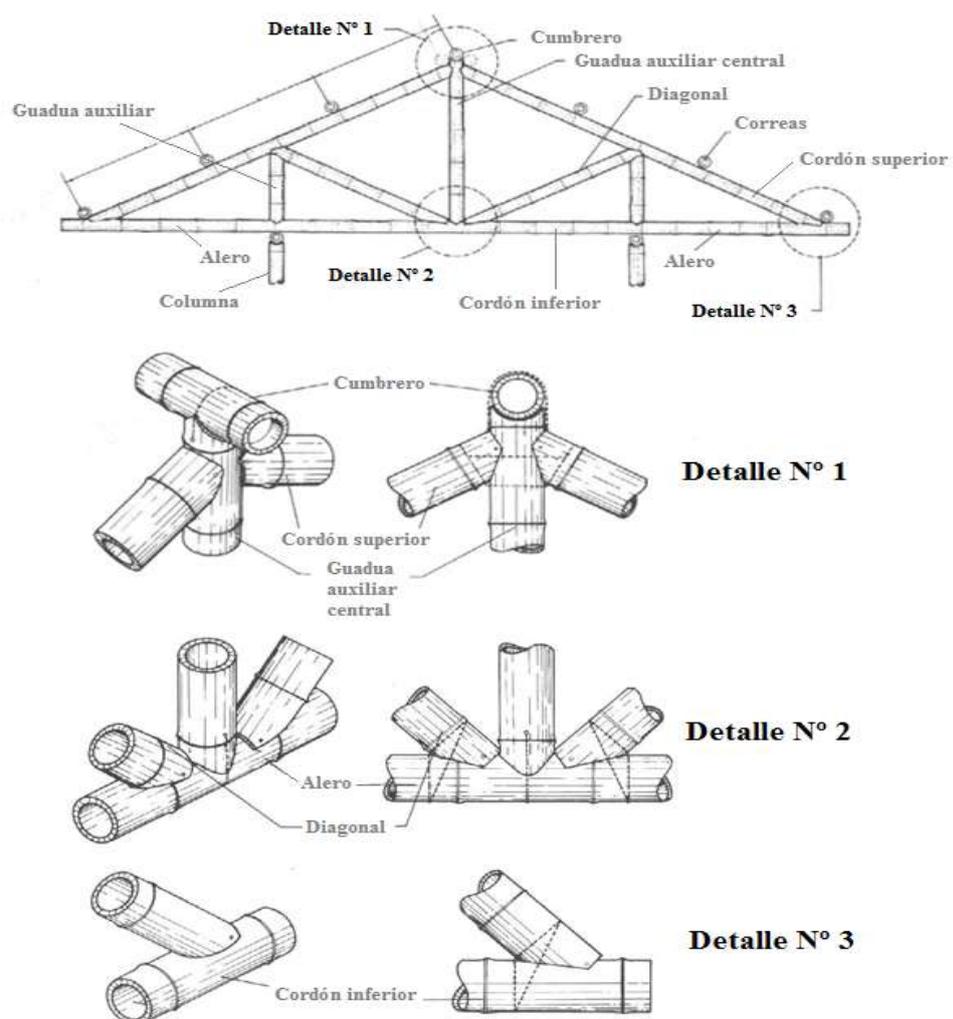
El procedimiento de aseguramiento de las latillas de culmos de GAK también se puede aplicar para el entablado de madera (NEC-11, Capítulo VII, 2013).

#### **6.14 CUBIERTAS PARA ESTRUCTURAS CON GAK**

La guadúa debe estar protegida de la intemperie (sol y agua), lo mismo que de la humedad ascendente. Por lo tanto se debe colocar bajo una cubierta con aleros lo suficientemente amplios para que la lluvia no llegue hasta la guadúa (Stamm, 2010).

### Construcción de la estructura de soporte

La estructura de soporte será una cercha simple formada por culmos de GAK o de madera, esta estructura será unida (por medio de una guadúa auxiliar) a la viga cargadora mencionada en secciones anteriores (Figuras 6.65 y 6.66) (Stamm, 2000). La separación entre las correas depende del tipo de acabado de cubierta que se utilice.



**Figura 6.65.** Estructura de soporte. Cercha simple formada por culmos de GAK (Hidalgo, 1998).

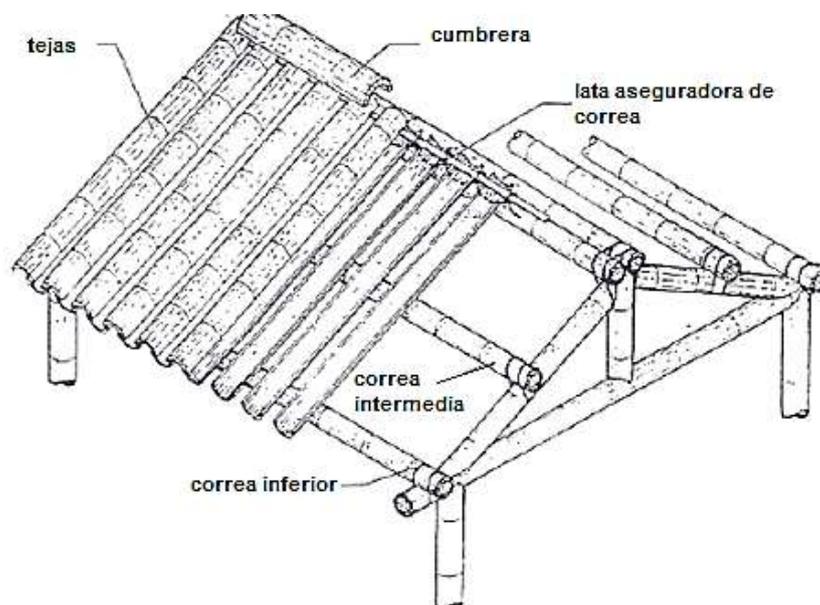


**Figura 6.66.** Estructura de soporte. Cercha simple de madera (Stamm, 2010).

### **Tipos de cubierta**

El tipo de cubierta depende de la arquitectura del puente y del presupuesto de la obra. En el presente trabajo se presentan algunos ejemplos de cubiertas para puentes de GAK.

- **Cubierta de teja**



**Figura 6.67.** Cubierta de teja (Hidalgo, 1998).



**Figura 6.68.** Cubierta de teja en puente Santa Fe (Stamm, 2010).

- **Cubierta de tipo vegetal**



**Figura 6.69.** Cubierta vegetal de Cade, puente El Bolero (FUNDEGUADUA A. , 2010).



**Figura 6.70.** Cubierta vegetal de Cade, puente San Plácido, Manabí (Fuente: Autor, 2014).

## 6.15 MANTENIMIENTO

Todo puente construido con GAK necesita revisiones, ajustes y reparaciones a lo largo de su vida útil. Las revisiones se deben ejecutar periódicamente y realizar los

arreglos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento estructural (NSR-10 R. C., 2010).

Se recomienda que el mantenimiento sea preventivo, siempre revisando la impermeabilización de la estructura total, el efecto de los rayos solares, variaciones de la temperatura, aumento de humedad ambiental, el ajuste en la tornillería y zunchos (Figura 6.71), estado de la cubierta, entre otros; corrigiendo algún detalle constructivo y/o estructural que se observe (Lucker, 2010).



**Figura 6.71.** Ajuste de pernos con taladro (Stamm, 2010).

Los elementos de sujeción mecánica como pernos, anillos, tuercas y otros, deben ser revisados para su mantenimiento con elementos anticorrosivos para su reajuste o sustitución en caso de ser necesario (NEC-11, 2013).

Si algún elemento de la estructura presenta rotura, aplastamiento, deformación excesiva o podredumbre se debe dar aviso inmediato al constructor, para que éste haga el reemplazo de la pieza (NSR-10 R. C., 2010).

Las piezas de bambú que presentan polvo, hongos causados por la humedad es necesario de que sean limpiados y pulidos (Figura 6.72) (NEC-11, 2013).



**Figura 6.72.** Limpieza de hongos en GAK, como parte del mantenimiento (FUNDEGUADUA A. , 2010).

Se debe realizar revisiones de las uniones y de las piezas estructurales, puesto que la dilatación o contracción ocasionada por el aumento o disminución la temperatura o humedad ambiental, pueden alterar su adecuado comportamiento estructural (NEC-11, 2013).

## CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS “ENSAYO DE CARGA ESTÁTICA”

#### Análisis de deflexiones

El límite respecto a deflexiones admisibles para carga viva según la guía de especificaciones para diseño de puentes peatonales (AASHTO, 1997) es:

$$\Delta \leq \frac{L}{500} \quad (52)$$

Donde:

L, es la luz libre del puente.

$\Delta$ , es la deformación admisible.

Aplicando (52):

$$\frac{20 \text{ m}}{500} = 0.04 \text{ m}$$

Entonces 0.04 metros o 40 mm es la deflexión admisible en nuestra estructura. Comparamos con las deflexiones en los puntos de interés, una vez aplicada la carga de 700 kg en la mitad de la luz libre del puente.

**Tabla 17.** Deflexiones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014).

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "CARGADA 100%" DIST. VERTICAL (m)	DEFLEXIONES (m)	DEFLEXIONES (mm)
1	0.232	0.231	-0.0007	-0.714
2	0.531	0.459	-0.0723	-72.344
3	0.752	0.745	-0.0066	-6.555
4	0.820	0.818	-0.0026	-2.603
5	0.755	0.745	-0.0104	-10.435
6	0.577	0.611	0.0333	33.296
7	0.248	0.249	0.0007	0.690

En la **tabla 17** el punto número dos (2), no cumple con el valor admisible, también se presenta una deflexión “positiva” significativa en el punto seis (6), esto ocurre por un reajuste en los elementos de la estructura frente a una solicitud de carga que provoca deflexiones positivas en ciertas juntas.

**Tabla 18.** Deflexiones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "CARGADA 100%" DIST. VERTICAL (m)	DEFLEXIONES (m)	DEFLEXIONES (mm)
10	0.892	0.906	0.0138	13.795
11	0.964	0.982	0.0181	18.085
12	1.096	1.109	0.0122	12.223
13	1.131	1.124	-0.0074	-7.400
14	1.243	1.248	0.0050	5.035
15	1.345	1.349	0.0042	4.220
16	1.514	1.513	-0.0007	-0.690
17	1.633	1.634	0.0007	0.678
18	1.710	1.700	-0.0100	-9.960
19	1.795	1.782	-0.0133	-13.272
20	1.801	1.793	-0.0079	-7.919
21	1.767	1.756	-0.0105	-10.544
22	1.730	1.726	-0.0046	-4.627
23	1.662	1.658	-0.0040	-3.995
24	1.571	1.568	-0.0034	-3.367
25	1.437	1.436	-0.0007	-0.683
26	1.226	1.224	-0.0014	-1.390
27	0.997	0.996	-0.0007	-0.710
28	0.753	0.753	0.0000	0.000
29	0.553	0.552	-0.0007	-0.747
30	0.343	0.342	-0.0015	-1.543

En las juntas de la **tabla 18** existen deflexiones con un comportamiento similar al de la tabla 17 sin sobrepasar el límite admisible, ningún valor trasciende o denota un comentario especial.

#### **Análisis de deformaciones permanentes.**

**Tabla 19.** Deformaciones existentes en los puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "DEFORMADA" DIST. VERTICAL (m)	DEFORMACIÓN (m)	DEFORMACIÓN (mm)
1	0.232	0.231	-0.0007	-0.714
2	0.531	0.529	-0.0027	-2.730
3	0.752	0.750	-0.0013	-1.311
4	0.820	0.818	-0.0020	-1.952
5	0.755	0.754	-0.0013	-1.304
6	0.577	0.609	0.0313	31.298
7	0.248	0.250	0.0021	2.070

Comparando las **tablas 17 y 19** se observó que la junta dos (2) que superaba el valor admisible, decreció notablemente al retirar la carga estática, de igual forma las demás juntas, la deformación positiva de la junta seis (6) se mantuvo casi sin modificaciones convirtiéndose en una deformación permanente.

**Tabla 20.** Deformaciones existentes en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	ETAPA "SIN CARGA" DIST. VERTICAL (m)	ETAPA "DEFORMADA" DIST. VERTICAL (m)	DEFORMACIÓN (m)	DEFORMACIÓN (mm)
10	0.892	0.906	0.0138	13.795
11	0.964	0.982	0.0181	18.085
12	1.096	1.109	0.0122	12.223
13	1.131	1.124	-0.0074	-7.400
14	1.243	1.248	0.0050	5.035
15	1.345	1.349	0.0042	4.220
16	1.514	1.513	-0.0007	-0.690
17	1.633	1.634	0.0007	0.678
18	1.710	1.700	-0.0100	-9.960
19	1.795	1.782	-0.0133	-13.272
20	1.801	1.793	-0.0079	-7.919
21	1.767	1.756	-0.0105	-10.544
22	1.730	1.726	-0.0046	-4.627
23	1.662	1.658	-0.0040	-3.995
24	1.571	1.568	-0.0034	-3.367
25	1.437	1.436	-0.0007	-0.683
26	1.226	1.224	-0.0014	-1.390
27	0.997	0.996	-0.0007	-0.710
28	0.753	0.753	0.0000	0.000
29	0.553	0.552	-0.0007	-0.747
30	0.343	0.342	-0.0015	-1.543

Comparando las **tablas 18 y 20** observamos deformaciones producidas por el reacondicionamiento de las piezas y son de carácter permanente ya que la estructura

no recupera su forma original, existieron deformaciones “positivas” en los puntos de análisis cercanos de las cimentaciones (10,11 y 12), estos se produce por la forma de reacción de la estructura (viga cargadora) que en esencia es una viga con una contra flecha pronunciada, se concibe de esta forma para que la viga funcione a flexión y esfuerzos axiales, y los apoyos restringen desplazamientos en sentido vertical como horizontal generando deflexiones positivas.

## 7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS “MODELO ANALÍTICO CARGA ESTÁTICA”

### Análisis de deflexiones

**Tabla 22.** Deflexiones analíticas en los puntos de 1-7 (Autor, 2014)

PUNTO	COMBINACION DE CARGA	DESPLAZAMIENTO Z	DESPLAZAMIENTO Z
		m	mm
P1	D+ESTATICA	-0.000581	-0.581
P2	D+ESTATICA	-0.00282	-2.82
P3	D+ESTATICA	-0.004608	-4.608
P4	D+ESTATICA	-0.005108	-5.108
P5	D+ESTATICA	-0.004608	-4.608
P6	D+ESTATICA	-0.002819	-2.819
P7	D+ESTATICA	-0.000581	-0.581

En la **tabla 22** se observó deflexiones dentro del límite admisible inferiores a 40 mm, todos los valores son “negativos” y muestran valores simétricos respecto al eje de simetría transversal debido al comportamiento ideal del modelo analítico, que ejecuta un análisis en condiciones ideales de construcción, así como una geometría idónea para la distribución de esfuerzos.

Comparando las **tablas 17 y 22** observamos que los valores teóricos de las deflexiones obtenidos a partir del modelo analítico son ligeramente inferiores a los reales, sin embargo difiere respecto a deflexiones “positivas” ya que en el modelo analítico la estructura se comporta de forma elástica por tanto no se producen deflexiones positivas al no existir el acomodamiento de elementos como ocurrió en la realidad.

Debo agregar que en los resultados del modelo analítico carga estática, no existen deformaciones permanentes ya que la estructura recupera su forma original una vez retirada la carga estática.

**Tabla 23.** Deflexiones analíticas en los puntos de 10-30 (Autor, 2014)

PUNTO	COMBINACION DE CARGA	DESPLAZAMIENTO Z	DESPLAZAMIENTO Z
		m	mm
P10	D+ESTATICA	-0.000028	-0.028
P11	D+ESTATICA	0.000951	0.951
P12	D+ESTATICA	0.000861	0.861
P13	D+ESTATICA	0.000329	0.329
P14	D+ESTATICA	-0.000593	-0.593
P15	D+ESTATICA	-0.001702	-1.702
P16	D+ESTATICA	-0.00283	-2.83
P17	D+ESTATICA	-0.003837	-3.837
P18	D+ESTATICA	-0.004614	-4.614
P19	D+ESTATICA	-0.005072	-5.072
P20	D+ESTATICA	-0.00509	-5.09
P21	D+ESTATICA	-0.005072	-5.072
P22	D+ESTATICA	-0.004614	-4.614
P23	D+ESTATICA	-0.003837	-3.837
P24	D+ESTATICA	-0.002829	-2.829
P25	D+ESTATICA	-0.001701	-1.701
P26	D+ESTATICA	-0.000592	-0.592
P27	D+ESTATICA	0.00033	0.33
P28	D+ESTATICA	0.000861	0.861
P29	D+ESTATICA	0.000951	0.951
P30	D+ESTATICA	-0.000028	-0.028

En la **tabla 23** las deflexiones son inferiores a 40 mm, todos los valores son “negativos” a excepción de las juntas 11 y 12 donde existen deflexiones positivas y se

repite el comportamiento simétrico en la magnitud de los valores respecto al eje de simetría transversal por tanto en las juntas 28 y 29 también hay deflexiones positivas.

Como ya se explicó no existen deformaciones permanentes en el modelo analítico, comparando las **tablas 18 y 23** se evidencia deflexiones con una magnitud inferior a las reales.

### 7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS “ENSAYO DE CARGA DINÁMICA”

#### Análisis de Período de vibración

**Tabla 25.** Resumen de frecuencias y períodos de vibración “ensayo de carga dinámica” (Autor, 2015)

		ACELERÓMETRO								
		A	B	C	D	E	G	H	I	PROMEDIO
Prueba N° 1	Frecuencia (Hz)	2.051	4.763	3.224	3.667	4.036	1.754	2.368	2.124	2.998
	Período (s)	0.488	0.210	0.310	0.273	0.248	0.570	0.422	0.471	0.374
Prueba N° 2	Frecuencia	17.586	13.476	14.453	17.553	17.749	14.404	11.523	7.153	14.237
	Período	0.057	0.074	0.069	0.057	0.056	0.069	0.087	0.140	0.076
Prueba N° 3	Frecuencia	0.977	1.074	1.123	1.293	1.342	1.196	0.854	0.732	1.074
	Período	1.024	0.931	0.890	0.773	0.745	0.836	1.171	1.366	0.967
Prueba N° 4	Frecuencia	0.830	0.927	1.245	1.464	1.586	1.147	0.952	0.805	1.120
	Período	1.205	1.079	0.803	0.683	0.631	0.872	1.050	1.242	0.946

### 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS “MODELO ANALÍTICO CARGA DINÁMICA”

#### Análisis de Período de vibración

Con el software SAP2000 V.17, conseguimos los siguientes resultados, bajo condiciones específicas para cada período de vibración.

Solo con el peso propio de los elementos de la estructura se obtuvo el período fundamental de la estructura:

$$f = 1.38956 \text{ Hz}$$

$$T = 0.71965 \text{ s}$$

Tras la aplicación de ninguna carga estática y 300 kg de carga dinámica cada 0.5 segundos se obtuvo:

$$f = 2.80771 \text{ Hz}$$

$$T = 0.35616 \text{ s}$$

Tras la aplicación de 700 kg carga estática y 300 kg de carga dinámica cada 0.5 segundos se obtuvo:

$$f = 16.35297 \text{ Hz}$$

$$T = 0.06115 \text{ s}$$

Tras la aplicación de ninguna carga estática y 300 kg de carga dinámica cada 1.0 segundos se obtuvo:

$$f = 0.85301 \text{ Hz}$$

$$T = 1.17231 \text{ s}$$

Tras la aplicación de 700 kg carga estática y 300 kg de carga dinámica cada 1.0 segundos se obtuvo:

$$f = 0.88038 \text{ Hz}$$

$$T = 1.13587 \text{ s}$$

Comparando los resultados prácticos de los ensayos en campo con los resultados teóricos del modelo analítico, se observa una gran paridad en la magnitud, existen variaciones pero son acorde a la diferencia de condiciones en cuanto a la concepción de los resultados ya que la realidad diferirá con el ideal constructivo del modelo

analítico, además que el puente fue construido hace 10 años sin ningún tipo de mantenimiento.

Los resultados muestran un comportamiento casi idéntico en la realidad y teoría para cada tipo de sollicitación y frecuencia analizado, concluyendo que la estructura se deforma y funciona de la forma prevista en el modelo analítico.

Durante los ensayos con carga dinámica, en el lapso de 60 segundos se produjeron grandes aceleraciones además de grandes deformaciones, pero la elasticidad de estructura demostró las propiedades sismorresistente de la GAK, ya que las deformaciones permanentes no excedieron los 40 milímetros.

## **7.5 ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE PEATONAL**

En el capítulo 6 se detallaron pasos para la construcción de puentes con GAK, sin embargo el puente que situado en la hacienda “Las Delicias” fue construido el año 2003 sin reparar en aspectos imprescindibles para garantizar la validez, seguridad y funcionalidad.

El puente tiene 12 años de funcionamiento, hasta el momento no se ha realizado ningún proceso de mantenimiento recomendado en el capítulo 6, debido a este descuido ciertos elementos que han sido expuestos a la humedad se encuentran en estado de putrefacción.

Los culmos de GAK empleada para la construcción del puente, no habían alcanzado la etapa de madurez (3 a 5 años) recomendada para uso estructural.

La caña no recibió ningún tipo de tratamiento de inmunización contra hongos e insectos, pero si tuvo un proceso de secado en la mata justo después de haber sido cortado el culmo.

Las uniones longitudinales y transversales, carecían de reforzamiento con mortero para evitar el corte producido por el perno de unión así como el aplastamiento en las secciones compuestas.

En el capítulo 6 se hizo referencia al sistema de cerchas prefabricadas, sin embargo el puente fue construido “in situ”, practica no recomendada ya que no se consigue una correcta coalición de los elementos de las juntas, además de fomentar discrepancias en la geometría por la dificultad de trabajar.

Pese a las fallas constructivas, el puente no evidencia deformaciones, ya que las solicitaciones que recibe son mínimas, la afluencia de usuarios es limitada y nunca está expuesto a sobrecarga.

## **CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES**

### **8.1 CONCLUSIONES**

- Tras la revisión bibliográfica, las propiedades físicas como la baja densidad lo convierten en un material sismorresistente ya que la estructura compuesta por culmos es muy liviana en comparación a una hecha con materiales de construcción tradicionales.
- Las fibras externas del culmo hacen la GAK muy resistente a fuerzas axiales, por la relación peso – resistencia y forma tubular conspiran para que sea un material perfecto para estructuras espaciales tipo cercha.
- La basta reserva endémica de GAK, gran velocidad de renovación, bajo costo, estética agradable y fácil manejo lo deberían posicionar entre nuestras principales opciones de materiales de construcción, en especial en la región litoral del Ecuador.
- No existen proveedores calificados, que realicen clasificación, inmunización y secado del material por falta de socialización del material y la exclusión del mismo de la norma ecuatoriana de construcción.
- Al momento de construir con GAK, el material se debe inmunizar contra plagas, aislar totalmente de la humedad, concebir un contenido de humedad homogéneo en los culmos para evitar variaciones en el diámetro, secar para evitar fracturas en el material.

- En el ensayo de carga estática las deflexiones en las juntas de interés no sobrepasaron el límite admisible de 40 milímetros, excepto por la junta número dos (2) la cual tuvo un reajuste permanente dentro de la estructura.
- En el ensayo de carga dinámica, de las cuatro pruebas realizadas ninguno de los promedios sobrepasó la unidad, el resultado más crítico fue el de carga estática y dinámica con una frecuencia de 2 saltos por segundo.
- Los resultados constataron una gran reacción elástica de la estructura, ya que durante los ensayos, el puente osciló a picos muy críticos y se deformó notablemente sobre el rango admisible de 40 milímetros.
- Ciertas juntas de interés se deformaron permanentemente debido al reajuste de los elementos que las conformaban, este comportamiento era previsto dado el defectuoso proceso de construcción y las bajas sollicitaciones a las que la estructura había sido expuesta.
- Las deflexiones teóricas obtenidas por medio del modelo analítico tampoco excedieron sin excepción el rango admisible de 40 milímetros, y no existen deformaciones permanentes debido a que la estructura teóricamente recupera totalmente su forma original.
- La forma en que se deformó la estructura durante la aplicación de las sollicitaciones y los períodos de vibración teóricos, son equivalentes a los obtenidos durante los ensayos experimentales con variaciones en la magnitud.
- Tras dialogar con el propietario del puente de GAK en la hacienda “Las Delicias”, se constató que el proceso constructivo del mismo fue defectuoso y ejecutado sin técnicas específicas para la GAK, los culmos utilizados no recibieron tratamiento previo lo cual compromete la vida útil, seguridad y funcionalidad de la estructura.

- Tanto la metodología de construcción descrita en capítulo 6, así como contar con elementos fiables sometidos previamente a procesos de inmunización y secado, garantizan una vida útil superior a los 50 años, así como un desempeño óptimo de las estructuras que cumplan estos parámetros.
- Nunca se ha efectuado un proceso de mantenimiento en la estructura analizada.
- Se valida la utilización del puente analizado para las solicitaciones mínimas a las que es sometido regularmente, así como uso debe considerarse estrictamente peatonal con una afluencia limitada de transeúntes.
- No se valida la utilización del puente analizado para solicitaciones mayores a las que es sometido regularmente, como la mayor afluencia de transeúntes si estuviera ubicado en un punto de mayor convocatoria de personas.
- La resistencia de la estructura aumentaría drásticamente si se realiza un proceso de mantenimiento, relleno de mortero y ajuste mecánico en juntas.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- Incluir en la norma ecuatoriana de construcción un capítulo que abarque el diseño estructural, proceso constructivo y mantenimiento, obtención y requerimientos del material GAK.
- A falta de un capítulo específico en el NEC-11 sobre construcciones en GAK y una discontinuada Guía de Recomendaciones para el uso de la Guadua en la Construcción del INEN, nos inclinamos por el uso del reglamento colombiano de construcción sismorresistente capítulo G, por ser de un país vecino que comparte características como la amenaza sísmica y la paridad en los culmos ya que la GAK es endémica de ambos países.

- Es requerido de manera “urgente” mantenimiento preventivo en la estructura de GAK en la hacienda “Las Delicias”, deberá realizarse reemplazo de culmos, ajuste de juntas, relleno con mortero y reforzamiento con zunchos metálicos sobre las juntas.

### 8.3 OBSERVACIONES

- El modelo analítico si cumple con la configuración real de los elementos y transmitió las cargas aplicadas durante el momento del ensayo sobre el puente de la hacienda “Las Delicias”, peso propio de la estructura, carga estática de ensayo y carga dinámica de ensayo, por aplicación directa sobre los elementos principales a la mitad de luz de 20 metros.
- Los elementos de cubierta y tablero peatonal se modelaron como elementos Área delgados “Shell-Thin”, simularon la masa y peso de la cubierta de material vegetal y de la duela respectivamente.
- Teóricamente los apoyos de un puente son de un extremo fijo (restricción vertical y horizontal) y del otro extremo móvil (restricción vertical) para así absorber las cargas de impacto, en la visita a la estructura observamos que los cuatro (4) apoyos son fijos, se modelaron de la misma forma en el modelo analítico.
- No se empleó nudos rígidos o placas en las juntas de varios elementos del modelo analítico, para determinar sus desplazamientos y deformación de la estructura.
- El módulo de elasticidad utilizado para los elementos el modelo analítico, no es el propio de los culmos del puente de GAK ya que no realizamos ensayos para determinarlo, se utilizó un valor teórico promedio de la norma colombiana.

- El modelo analítico tuvo cinco (5) diferentes análisis, peso propio más carga estática de ensayo por el cual determinamos las deflexiones que sufrió la estructura; carga estática de ensayo más carga dinámica de ensayo con frecuencias diferentes de las cuales obtuvimos períodos de vibración y deformaciones en la estructura; carga dinámica de ensayo con frecuencias diferentes de las cuales obtuvimos períodos de vibración y deformaciones en la estructura.
- Así mismo se corren cinco (5) casos de análisis, carga muerta del tipo estático lineal, carga de ensayo estática de tipo estático lineal, el caso modal que contiene los casos históricos lineales modales “ED1” y “ED2”.
- Los períodos del modelo analítico fueron únicos para la estructura, mientras que en los períodos de los ensayos se tomó el promedio de todos los acelerómetros, los resultados obtenidos en campo fueron me promedio superiores a los teóricos.
- En el modelo analítico se emplearon tres (3) tipos de fuentes de masa para definir su análisis modal, una que representa los elementos propios de la estructura, la masa dinámica que representa la carga de ensayo dinámico, la masa estática dinámica que representa las cargas de los ensayos estático y dinámico combinadas.
- Las cargas y deformaciones no fueron las proyectadas durante el recorrido paso a paso de los análisis modales para cada tipo de fuente de masa después de correr el modelo analítico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1997). *Guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales*. Los Angeles.
- AIS, A. (2002). *Manual de Construcción Sismorresistente de Viviendas en Bahareque Encementado*. Bogotá.
- Botero, L. (2013). *REPRODUCCION DE LA GUADUA POR EL METODO DE CHUSQUINES*. GUAYAQUIL.
- Cimbala, J. (22 de Febrero de 2010). Penn State University. *Fourier Transforms, DFTs, and FFTs*, 1-7.
- Cobos, J., & León, X. (2007). *PROPIEDADES FÍSICAS-MECÁNICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH Y APLICACIÓN AL DISEÑO DE BATERIAS SANITARIAS DEL IASA II*. SANGOLQUÍ.
- FUNDEGUADUA. (2010). Recomendaciones Técnicas Generales. *Arquitectura e Ingeniería con Bambú*. Pereira.
- FUNDEGUADUA, A. (2010). *Fundeguadua*. Recuperado el 2014, de [www.fundeguadua.org](http://www.fundeguadua.org)
- GAHONA, M. (2007). *USOS ALTERNATIVOS DEL BAMBÚ PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CONDICIONES DEL HÁBITAT*. LOJA.
- Galvis, P., & Rodriguez, S. (2007). *TRATAMIENTO FISICO-QUIMICO A LA GUADUA PARA LA PRODUCCION DE BALDOSAS POR EL METODO DE LAMINADO PEGADO*. BUCARAMANGA.
- Grupo Andino. (1984). *Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino*. Cartagena.
- Hidalgo, O. (1998). *Manual de construcción de bambú*. Bogotá.
- LANDAURO, D. (2010). *Características de Preservación por el Método de Inmersión del Tallo de GAK, proveniente del Distrito de la Florida, Cajamarca*. LIMA.
- Lucker, H. (2010). Estudio de suelo. Puente Peatonal Barrio San Judas. *Caña guadua*. Pereira.
- Medín, J. (2006). Física de las Vibraciones. *Física General*, 1-60.
- Mendez, J., & Palominos, M. (2005). *Curado y preservación de la caña guadúa seleccionando agentes y preservantes químicos*. GUAYAQUIL.

- MIDUVI, C. (2013). *Capítulo 17: Utilización de la Guadua angustifolia kunth en la construcción*. Quito.
- Miyara, F. (1 de Octubre de 2004). *www.fceia.unr.edu.ar*. Obtenido de Conversores: <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>
- Montoya, J. (2008). EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA PRESERVACIÓN DE LA GAK. *SCIENTIST OF TECHNICA* N°38, 443-447.
- Narváez, L. (2013). *DESARROLLO DE LOSAS CON CAÑA DE GUADUA ANGUSTIFOLIA Y ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y ECONÓMICO CON LOS SISTEMAS DE LOSAS TRADICIONALES UTILIZADOS EN NUESTRO MEDIO*. Sangolquí.
- NEC-11, N. E. (2014). *Capítulo IV: Estructuras de hormigón*. Quito.
- NSR-10, R. C. (2010). *CAPITULO G.12 ESTRUCTURAS DE GUADUA*. BOGOTÁ.
- NSR-10, R. C. (2010). *Título G.12 - Estructuras de Guadua*. Bogotá.
- Silva, V. (2008). *Uso del Bambu para Construcción Civil*. Brasília.
- Stamm, J. (2010). Construction with Bamboo. *Caña guadua*, (págs. 4,5). Bogotá.
- Stamm, J. (2010). Guadua Productor y Protector. *Diplomado Caña Guadua*, (págs. 6,7). Bogotá.
- Tandazo, J., & Flores, G. (2012). *PROCESO DE INDUSTRIALIZACION 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*. Sangolquí.
- TENECHÉ, G. (2007). *GUADUA Y BAMBU COLOMBIA*. Obtenido de <http://guadaybambu.es.tl/Estudio-7.htm>
- Teneche, G. (2011). *Guadua y Bambú Colombia*. Recuperado el 18 de Enero de 2015, de [http://guadaybambu.es.tl/CONSTRUCCION-SISMO-RESISTENTE-\\_2.htm](http://guadaybambu.es.tl/CONSTRUCCION-SISMO-RESISTENTE-_2.htm)
- Vélez, L. (16 de Abril de 2013). *Blogger*. Obtenido de Propiedades materiales de construcción: <http://propiedadesmaterialesdeconstruccin.blogspot.com/2013/04/propiedades-mecanicas-de-los-materiales.html>
- Wikipedia.org. (20 de Septiembre de 2012). Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier](http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier)

Wikipedia.org. (26 de Agosto de 2014). Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Peso\\_espec%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Peso_espec%C3%ADfico)