

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH**



Autor

ING. EDGAR ALEJANDRO BECERRA PEÑUELA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
PROGRAMA MAESTRIA INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2020**

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH**

Trabajo de Grado para optar al título de
Magister en Infraestructura Vial

Director Trabajo de Grado
Juan Manuel Lizarazo Marriaga
Ingeniero Civil MSc - PhD

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
PROGRAMA MAESTRIA INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2020**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá,

Día	Mes	Año
-----	-----	-----

Dedicatoria

A Dios y a mi familia por su incondicional apoyo en este proceso de mi vida, Abuela y tías, Silvina Poveda de Peñuela, Leonor Peñuela Poveda, Martha Inés Peñuela Poveda y Ana María Peñuela Poveda, por su incalculable amor y por su ejemplo de vida. Y total agradecimiento a el Ingeniero Jorge Enrique Franco Carbonell acompañamiento, conocimiento y total apoyo.

Edgar Alejandro Becerra Peñuela

A-KA-SA-MA-RA-TSA-SHEN-MARA-YA-PHE



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	OBEJTIVOS	16
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	LA GUADUA	17
3.1	EL BAMBÚ - MATERIAL	17
3.2	ELEMENTO ECOLÓGICO PARA CONSTRUIR ESTRUCTURAS.	19
3.3	PROPIEDADES FÍSICOMECAÑICAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA.....	20
4.	ESTADO DEL ARTE	26
4.1	LITERATURA NACIONAL.....	26
4.2	LITERATURA INTERNACIONAL	36
5.	METODOLOGIA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA.....	39
5.1	PRELIMINARES.....	39
5.1.1	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	39
5.1.2	DOCUMENTOS DE LOCALIZACIÓN DEL PUENTE.....	40
5.1.3	PRE DIMENSIONAMIENTO ARQUITECTÓNICO.....	41
5.1.4	DISEÑO ARQUITECTÓNICO	41
5.1.5	PREDIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL EN 3D	42
5.1.6	MODELO ALÁMBRICO.....	45
5.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	46
5.2.1	PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE. ...	47
5.2.2	MODELACIÓN DEL MATERIAL ESTRUCTURAL UTILIZADO.	48
5.2.3	MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y SECCIONES DE LOS ELEMENTOS EMPLEADOS EN EL PROYECTO.	49
5.2.4	DEFINICIÓN DE LAS COMBINACIONES DE CARGAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.	51
5.2.5	PROCESO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.	61
5.2.6	ESTUDIO COMPARATIVO DE LA TABLA A.1.3.1 NSR-10	61
5.2.7	DETERMINACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE PUENTE - SETRA.....	65
5.3	DISEÑO DE ELEMENTOS.....	68
5.3.1	COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA GUADUA.	68



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

6.	UNIONES.....	79
6.1	TIPOS DE CORTES – G.12.11.2	79
6.2	UNIONES EMPERNADAS (G.12.11.3)	80
6.3	OTRAS UNIONES (G.12.11.4).....	86
7.	ESTUDIO DE CASO n° 1 - MODELO ESTRUCTURAL.....	87
7.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	87
7.1.1	MODELO ESTRUCTURAL.....	87
7.1.2	EFFECTOS ORTOGONALES	87
7.1.3	CARGAS	87
7.1.4	COMBINACIONES DE CARGA	102
7.1.5	MATERIALES	103
7.1.6	SECCIONES EMPLEADAS.....	105
7.1.7	DETERMINACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE PUENTE - SETRA.....	107
7.2	DISEÑO DE ELEMENTOS.....	110
7.3	VERIFICACIÓN DE DEFLEXIONES	115
7.4	DISEÑO DE CONEXIONES	117
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
9.	BIBLIOGRAFIA	122
	ANEXOS	125



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grafica ilustrativa curva esfuerzo deformación ensayo a compresión. Fuente: Rua E. Villamizar N. Gonzalez L. Aperato A. A.A. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la guadua angustifolia kunth como material estructural. Pg. 5.	24
Figura 2: Curva esfuerzo deformación ensayo a tensión. Fuente: González H. Montoya H. bedoya j. 2007. Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie Guadua Angustifolia Kunth, Scientia et Technica Año XIII, Universidad tecnología de Pereira. Pg. 504.	25
Figura 3: Levantamiento topográfico. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.	40
Figura 4: Diseño Arquitectónico de un puente moderno. JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.	41
Figura 5: Diseño Arquitectónico. JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.	42
Figura 6: Geometrías algunos tipos de cerchas y armaduras para puentes peatonales en guadua. Gonzalez R., 28 marzo 2016. Análisis Estructural. “La solución es una necesidad: las cerchas en la ingeniería”. Prontubcam. 8va edición.	44
Figura 7: Vista isométrica del predimensionamiento, Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.	44
Figura 8: Modelo alámbrico, Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	45
Figura 9: Vista en Perfil planos de Proyecto. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	48
Figura 10: Vista en Perfil – Modelo en SAP2000. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	48
Figura 11: Vehículo de diseño para puentes peatonales Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.	57
Figura 12: Verificación del proceso de análisis del modelo en 3 dimensiones. Elaboración propia. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	61
Figura 13: Corte Recto. Fuente NSR-10.	79
Figura 14: Corte Boca de pescado. Fuente NSR-10.	80
Figura 15: Corte Pico de flauta. Fuente NSR-10.	80
Figura 16: Zunchos. Fuente NSR-10.	81
Figura 17: G.12.11-5. Fuente NSR-10.	83
Figura 18: 12.11-6 – Carga Q. Fuente NSR-10.	83
Figura 19: G.12.11-7. Fuente NSR-10.	84



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 20: Definir “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	93
Figura 21: Crear “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	93
Figura 22: Definir parámetros “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	94
Figura 23: Definición vehículo ecuestre. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	95
Figura 24: Vehículo de diseño para puentes peatonales Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.	96
Figura 25: Definición vehículo H5. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	97
Figura 26: Definición de patrones de carga. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	97
Figura 27: Definición de carga móvil. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	98
Figura 28: Definición de combinación de carga vehicular. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	98
Figura 29: Asignación de cargas muertas puntuales. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	99
Figura 30: Asignación de cargas muertas lineales. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	99
Figura 31: Espectro de diseño. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	101
Figura 32: Esquema de referencia calzadas. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	103
Figura 33: Vista 3D sección típica. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Módulos de elasticidad de la guadua, tomados de la sección G.12.7.3 de la NSR-10, en MPa y con un contenido de humedad (CH) de 12%, Fuente NSR-10.	49
Tabla 2: Esfuerzos admisibles de la guadua con un (CH) del 12%, en MPa. Fuente: NSR-10.	49
Tabla 3: Modelación de secciones transversales personalizadas en SAP2000. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	50
Tabla 4: Tipos de carga manejados en el CCP-14 y aplicables al diseño estructural de puentes peatonales en guadua. Parte 1: Cargas permanentes. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	51



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 5: Tipos de carga manejados en el CCP-14 y aplicables al diseño estructural de puentes peatonales en Guadua. Parte 2: Cargas transitorias. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.....	52
Tabla 6: Tipo de vehículo utilizado para el diseño de puentes peatonales. Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.....	57
Tabla 7: Condiciones de aplicación de cargas vivas sobre el puente. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	60
Tabla 8: Procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y puentes. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela.	62
Tabla 9: Rangos de aceleración (in . m/s ²) para vibraciones verticales, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.....	66
Tabla 10: Rangos de aceleración (in . m/s ²) para vibraciones horizontales, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.....	66
Tabla 11: Rango de frecuencia (Hz) de vibración vertical y longitudinal, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.....	67
Tabla 12: Rango de frecuencia (Hz) de vibración transversal horizontal, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.....	67
Tabla 13: Coeficientes de modificación por duración de carga. Fuente NSR-10.	68
Tabla 14: Coeficientes de modificación por contenido de humedad. Fuente NSR-10.....	68
Tabla 15: Coeficientes de modificación por temperatura (Ct). Fuente NSR-10...	69
Tabla 16: G.12.9-1. Coeficiente de longitud efectiva (*).Fuente NSR-10.	72
Tabla 17: Clasificación de columnas. Fuente NSR-10.....	73
Tabla 18: Cuadro de cálculo de elementos en Guadua. Fuente: Ing. Rodolfo Felizzola Contreras. 2017.....	77
Tabla 19: G12.11-1 Dimensiones mínimas de arandelas para uniones empernadas. Fuente NSR-10.....	82
Tabla 20: Cargas admisibles para uniones empernadas con doble cizallamiento. Fuente NSR-10.	85
Tabla 21: Coeficiente de reducción por grupo Cg. Fuente NSR-10.	86
Tabla 22: Definición de patrones de Carga. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.	87



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 23: Cargas muertas en cubierta. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.	89
Tabla 24: Cargas muertas en tablero inferior. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.	90
Tabla 25: Vehículo empleado según ancho del tablero Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.	96
Tabla 26: Selección tipo del suelo. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	101
Tabla 27: Combinaciones de carga viva. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.	103
Tabla 28: Módulo de elasticidad de la guadua según G.12.7.3. Fuente NSR-10.	103
Tabla 29: Esfuerzos admisibles de la guadua con un (CH) del 12%, en MPa. Fuente NSR-10.	104
Tabla 30: Secciones empleadas. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	105
Tabla 31: Propiedades geométricas de las secciones. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	106
Tabla 32: Periodos modales y frecuencias. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	108
Tabla 33: Clase de puente a determinar. Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.	110
Tabla 34: Fuerzas por tipo de elemento en kN y kN*m. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.	111
Tabla 35: Cuadro de cálculo de elementos en Guadua. Fuente: Ing. Rodolfo Felizzola Contreras. 2017.	113
Tabla 36: Deflexiones admisibles según G.12. Fuente NSR-10.	115
Tabla 37: Combinaciones de carga para verificar deflexiones según G.12. Fuente NSR-10.	115
Tabla 38: Verificación de deflexiones de guadua según la NSR-10, Título G.12.	116
Tabla 39: Cargas admisibles para uniones empernadas según G.12. Fuente NSR-10.	117
Tabla 40: Coeficiente de reducción por grupo según G.12 Fuente NSR-10.	118
Tabla 41: Cálculo de conexiones para elementos en guadua según la NSR-10, título G.12.	119

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a compresión axial. Fuente: Luna P. Lozano J. Takeuchi C. A.A. Guías de diseño para



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

	<i>estructuras de Guadua Angustifolia Kunth. Guadua y su industria. Pg. 129.....</i>	<i>23</i>
Fotografía 2:	<i>Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a compresión perpendicular a la fibra. Fuente: Fuente: Luna P. Lozano J. Takeuchi C. A.A. Guías de diseño para estructuras de Guadua Angustifolia Kunth. Guadua y su industria. Pg. 129</i>	<i>23</i>
Fotografía 3:	<i>Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a flexión. Fuente: Sapuyes E. Osorio J. Takeuchi C. Duarte M. Erazo W. junio 2018. Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua Angustifolia kunth de Pitalito, Huila. Revista de investigación, Vol 11. Pg 102.</i>	<i>25</i>
Fotografía 4:	<i>Puente de los indígenas Paeces en el municipio de Tierradentro en el departamento del cauca. Construido en el año 1621. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.</i>	<i>27</i>
Fotografía 5:	<i>Puente de guadua de la provincia de Neiva, municipio de la Plata. Fuente: Puente de guaduas sobre el río de la Plata, frente a la ciudad, provincia de Neiva Manuel María Paz, 1857 Comisión Corográfica Biblioteca Nacional de Colombia.</i>	<i>27</i>
Fotografía 6:	<i>Puente en el municipio de Tierradentro en el departamento del Cauca, construido en 1995. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.</i>	<i>28</i>
Fotografía 7:	<i>Puente ubicado en la UTP se construyó en el año 2000. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.</i>	<i>29</i>
Fotografía 8:	<i>Puente en bambú ubicado en el Colegio Liceo Francés, su construcción se realizó en Septiembre 2001. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.....</i>	<i>29</i>
Fotografía 9:	<i>Puente en bambú ubicado en la Ciudad de Pasto en el departamento de Nariño, Construido en 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.</i>	<i>30</i>
Fotografía 10:	<i>Puente peatonal construido en la ciudad de Cúcuta, Colombia. En julio 2008. Fuente Jacome J. 2014. El puente de Guadua Arnulfo Briceño.....</i>	<i>31</i>
Fotografía 11:	<i>Puente de guadua conocido como “Jenny Garzón”. Este puente se ubica en la localidad de Engativá en la ciudad de Bogotá, en la troncal de la calle 80, conecta la ciudad con zona rural. construido 2003. Fuente: Industria, Energía y Medioambiente. 2016. El puente de guadua de la ciudad de Bogotá.</i>	<i>32</i>
Fotografía 12:	<i>Puente Fundeguadua, se construyó sobre el rio Cali, en el año 2004. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.</i>	<i>33</i>
Fotografía 13:	<i>Puente ubicado en Santa Fe de Antioquia, construido en Septiembre 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.....</i>	<i>33</i>
Fotografía 14:	<i>Puente ubicado en Santo Domingo Medellín, fue construido en el 2008. Fuente: Sánchez D., 2013. Medellín: el puente de guadua que también colapsó.</i>	<i>34</i>



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Fotografía 15:** Puente ubicado en el corregimiento de Mulaló, municipio del Valle del Cauca. Construido en el año 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua. 35
- Fotografía 16:** Puente en proceso de ejecución, puente poliédrico para construir en la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2016. Universidad Tecnológica de Pereira..... 35
- Fotografía 17:** Puente de Guanezhoua, Ubicado en la reserva de la montaña Nankun en la provincia de Guangong. Año de construcción 2005. Fuente: Ochoa R. Real Estate Market & Lifestyle. Simón Vélez y Acero Vegetal..... 36
- Fotografía 18:** Puente ubicado en Davao Filipinas, periodo de construcción de abril a mayo en el año del 2011. Fuente: Franco J., 2013. puente peatonal de bambú es construido por la comunidad de Davao en Filipinas. .37
- Fotografía 19:** Puente ubicado Sibang Kaja, Bali, construido en diciembre 2011. Fuente: Hahim A. 2007. The Green School. PT Bambu. 37
- Fotografía 20:** Puente peatonal en bambú en bietigheim bissingen Alemania. Fuente: Gonzalez S., Holzbrücke / Bridge made of wood..... 38
- Fotografía 21:** Puente peatonal en Sumatra Indonesia, longitud de 37 metros. Construido en 2017. Fuente: Puente de carretera de Bambu.2017. Fibra Awar..... 38
- Fotografía 22:** cubierta del puente. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP..... 89
- Fotografía 23:** tablero inferior del puente. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP. 90



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

ABSTRACT

This degree project is focused on structuring a methodology for the structural design of pedestrian bridges in guadua using *Guadua angustifolia* Kunth as a main material, a species that abounds in Colombia. According to the review of Colombian standards, it is concluded that there is no methodology for the design of pedestrian bridges in guadua, which is why it was decided to study national and international references to structure this methodology. Given the above, the state of the art of some bridges built in Colombia and other countries was made, which confirms that there is no standard methodology for the design of pedestrian bridges in Guadua. The development of the methodology begins with preliminary studies, such as: Topographical survey, bridge location, architectural pre-dimensioning, architectural design and wireframe 3D model to continue with the structural calculation; As a result of the calculation, the number of guaduas is defined, which is formed by each of the elements and steel connections. With this degree work I hope it will be a significant contribution for the future construction of pedestrian bridges in Guadua in our country.

RESUMEN

Este proyecto de grado está enfocado a estructurar una metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua empleando como material principal la guadua *angustifolia* Kunth, especie que abunda en Colombia. Conforme a la revisión de las normas colombianas se concluye que no existe una metodología para el diseño de puentes peatonales en guadua, razón por la cual se optó por estudiar las referencias nacionales e internacionales para estructurar esta metodología. Dado lo anterior se realizó el estado del arte de algunos puentes construidos en Colombia y otros países, lo cual nos afirma que no existe una metodología normalizada para el diseño de puentes peatonales en guadua.

El desarrollo de la metodología inicia con los estudios preliminares, como lo es: Levantamiento topográfico, localización del puente, pre dimensionamiento arquitectónico, diseño arquitectónico y modelo alámbrico en 3D para continuar con el cálculo estructural; Como resultado del cálculo se definen el número de guaduas el cual se conforma cada uno de los elementos y sus conexiones metálicas. Con este trabajo de grado espero sea un aporte significativo para las futuras construcciones de puentes peatonales en guadua en nuestro país.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo de grado consiste en suministrar los lineamientos básicos para realizar el análisis y diseño estructural de un puente peatonal proyectado en guadua. El análisis incluye el planteamiento de la información geométrica y mecánica de los diferentes materiales que constituirán la estructura proyectada. Con base a esta información se plantearán modelos matemáticos simples y compuestos para evaluar los diferentes esfuerzos a los que encuentran sometidos los diferentes elementos estructurales.

De lo anterior se realizará una metodología la cual será el paso a paso del procedimiento de un diseño estructural de un puente en guadua, esta metodología obedece a que en el reglamento colombiano sismoresistente NRS-10 en el Capítulo G.12 Estructuras en Guadua, G.12.1 Alcance y G.12.1.3 expresa: “El diseño de construcciones para vivienda estará limitado a dos pisos, no se permitirán muros de mampostería o concreto en el nivel superior de las edificaciones. Esta norma no se podrá utilizar para el diseño de ningún tipo de puente o estructuras diferentes de edificaciones, limitándose a aquellas cuyo uso sea vivienda, comercio, industria y educación”; información suministrada por el decreto 945 del 2017 la cual especifica en el numeral 5.2.4 Combinaciones de carga ofrecidas por el NSR-10.

Por otra parte, no se encontró en el Código Colombiano de Puentes CCP-14 ninguna sección relacionada para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua. Sin embargo, en la sección 8 “Estructuras en Madera” expresa: Se omite la presente sección en vista de la escasa investigación nacional acerca de las propiedades físico-mecánicas de maderas colombianas para su uso estructural de puentes vehiculares.

Sin embargo, el CCP-14 emplea el código “AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS – 2012”, sección 8: Wood Structures, pero al revisar estos códigos se encontró que la AASTHO utiliza el método de Estados Limites que si bien las NSR-10 recomienda diseñar estructuras en guadua por esfuerzos admisibles, no es conveniente combinar estos dos métodos.

En Colombia se han construido puentes peatonales en guadua de diferentes luces, lo cual ha hecho que cada profesional diseñe de acuerdo con su criterio. El objetivo de esta metodología es implementar un documento guía, el cual los profesionales en ingeniería civil lo puedan utilizar para futuros diseños estructurales de puentes peatonales.

La metodología que se tuvo en cuenta para el diseño estructural fue la siguiente: 1. Normas técnicas utilizadas en el diseño de la estructura. 2. Especificaciones de los materiales de la estructura. 3. Cargas permanentes y ocasionales que pueden afectar la estabilidad y las condiciones de servicio de la estructura. 4. Método de análisis de la estructura. 5. Esfuerzos máximos en elementos típicos. 6. Diseño de los elementos en guadua. 7. Un análisis comparativo del cálculo estructural con la metodología propuesta y los componentes estructurales del puente diseñado en el 2001 (Puente Peatonal Guaducto de la UTP).

El diseñador hace entrega de las memorias de cálculo las cuales incluyen datos e información. Junto con esta se citan normas, códigos, reglamentos, y criterios de análisis y



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

diseño basados en bibliografía y experiencias recolectadas por el diseñador, que se han considerado para realizar el análisis y diseño de la estructura de estudio.

A-KA-SA-MA-RA-TSA-SHEN-MARA-YA-PHE



2. OBEJTIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear una metodología de diseño para puentes peatonales en guadua Angustifolia Kunth.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el comportamiento mecánico de la guadua Angustifolia Kunth.
- Determinar los pasos esenciales en el proceso del diseño estructural de un puente peatonal en guadua Angustifolia Kunth.
- Realizar un caso de estudio con la metodología para el diseño estructural de puentes en guadua Angustifolia Kunth.



3. LA GUADUA

3.1 EL BAMBÚ - MATERIAL

La guadua como material fue descubierta por los amerindios que vivían en América antes de la llegada de los españoles. Sin embargo, esta planta o material era utilizado para la fabricación de viviendas, puentes, balsas, herramientas, etc. En el año de 1806, Alexander von Humboldt y Amadeo Bonpland describieron esta planta luego de ser vista en Colombia y la llamaron *Bambusa guadua*, luego en 1822 el botánico alemán Karl Sigismund Kunth después de un detallado estudio, dedujo que este bambú americano era único y diferente y creó el género *Guadua* y la especie *Angustifolia Kunth*.

Este recurso se utilizaba ya desde épocas remotas por parte de los primitivos pobladores de los Andes, y actualmente sigue siendo usada, especialmente en la región centro-occidental de Colombia. Este cultivo por presentarse en esta zona se considera como una de las plantas nativas más representativas de los bosques andinos.¹

Por otra parte, el bambú endémico entre varias especies es el más visible, como “*Guadua Angustifolia*”, este podía ser un “propulsor sin igual” de la reforestación, debido a que sus tallos son de crecimiento muy rápido. En Colombia por tener un clima templado los cultivos de guadua se desarrollan de manera óptima, estas zonas denominadas templadas van desde los 900 hasta los 1.900 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas promedio de entre 20 a 26 grados centígrados, humedad relativa del 80 por ciento y, como mínimo, una precipitación anual de 1.000 milímetros. Además, la guadua es captadora de CO₂ y eso un argumento importante para la preferencia de reforestación.

Cada nación tiene que considerar el insumo energético de los materiales recomendados en sus normas de construcción. Los materiales como el cemento y el ladrillo requieren fuentes de energía tradicionales que generan CO₂, para su producción, se puede utilizar el término “arquitectura cultivable” para estructuras hecha en guadua.

Lo anterior muestra que los bosques son depósitos de energía vital para el hombre, como lo describe la historia, debido a la ausencia de bosques se han perdido la energía y esto lleva a grandes imperios en decadencia. Una de las razones ecológicas y económicas que van de la mano en la estrategia del desarrollo sostenible.²

En Colombia, durante los últimos 15 años, se ha desarrollado investigación en guadua, como también se ha hecho en muchos países tropicales, con otras especies del bambú.

¹ Buitrago J., 1943. Historia de la guadua. *Hombres trasplantados*. p. 227.

² Luna, P., Lozano, J., y Takeuchi, C. 2013. Guías de diseño para estructuras de *Guadua Angustifolia Kunth*. *Guadua y su Industria*. P 129 -129.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Ahora el reto es la construcción con la combinación de la fuerza del bambú, con estructuras livianas y eficaces.³

Oscar Hidalgo López mediante documentos de la universidad Nacional de Colombia publico diferentes libros y manuales para la construcción de la guadua, además estableciendo limites, posibilidades y métodos de inmunización. Pero el éxito para la construcción de la guadua se expuso en los edificios, con aleras hasta de 8 metros diseñados y construidos por el arquitecto Simón Vélez, después de descubrir la inyección del mortero en los tubos de bambú. Debido a este aporte se definió el diseño de la guadua. Ahora se facilita la construcción en guadua elemento por elemento, esto debido a la tornillería, los artesanos de la región adoptaron el nuevo método de la construcción.⁴

Se observa que este tipo de estructuras son antisísmicas, no necesariamente tienen que ser rígidas, pero debe resistir ondas de choque que puedan flexionar en diferentes secciones. Este material por ser tan liviano, el bambú tiene la ventaja de que se mueve al ritmo que se mueve la tierra y por eso en Colombia lo catalogan como un material sismo-indiferente, en otras palabras, antisísmico.

El terremoto del eje cafetero en 1999, derribó edificios de ladrillo, varias estructuras de concreto reforzado e incluso, algunas casas de bahareque con bases o techos podridos. Debido a esto, el gobierno alemán desarrollo por medio de la agencia de cooperación Técnica (GTZ), un proyecto de reconstrucción y rehabilitación de 280 viviendas sismoresistentes, utilizando la guadua como elemento estructural en su construcción. También hizo capacitaciones en los beneficiarios para emplearse como la autoconstrucción.⁵

Se han realizado diferentes estudios (ensayos a tracción) para establecer las propiedades físico-mecánicas de la guadua, se confirma que la fuerza a tracción es paralela a las fibras y es comparable con el acero. Por lo anterior, se han establecido normas especiales con la guadua, como: protección por diseños contra la humedad, anclajes adecuados y uniones adecuadas para la transmisión de fuerzas. Además, se requiere de parámetros para la construcción de cerchas y el entrenamiento practico en el almacén.

Debido a la práctica los indios Paeces son verdaderos maestros de la construcción de puentes en Guadua, ellos combinan el arco falso hecho en guadua, con tirantas del mismo material, usando la guadua a tracción, amarran estas con bejucos en pilones o arboles de la ribera.⁶

³ Teneche G., “Plantar guadua, semillero y vivero de guadua angustifolia, reforestar con guadua” [En línea]. Disponible en: <https://guaduabambucolombia.com/2013/09/24/plantar-guadua-semillero-y-vivero-de-guadua-angustifolia-reforestar-con-guadua/> 24 septiembre 2013. [Accedido: 12-sep-2017].

⁴ Hidalgo O., Manual de Construcción del bambú. Bogotá – Colombia. Estudios Técnicos colombianos Ltda – Editores.

⁵ Hidalgo O. 2003. Bamboo: The Gift of the Gods. Minnesota – EEUU. The Author.

⁶ Carmiol V., “Bambú Guadua en puentes peatonales”, Tecnología en Marcha, Vol. 23, N° 1, P. 29-38, enero-marzo 2010.



3.2 ELEMENTO ECOLÓGICO PARA CONSTRUIR ESTRUCTURAS.

La guadua se considera un recurso natural renovable de excelencia, sus múltiples usos se implantaron en la vida cotidiana, como fuente de energía alternativa, vivienda, puentes, cercas y artesanías. El café y la guadua son las dos plantas que más han contribuido con el desarrollo económico y social del país.

La guadua hoy se reconoce, técnica y científicamente, como material para la construcción. El aprovechamiento sostenible de los guaduales, se autofinancia con el valor agregado, empleando el tallo de la guadua en obras permanentes y en aplicaciones técnicas donde realmente se valoriza su extraordinaria relación peso/fuerza/costo energético.⁷

Una ventaja de la guadua es su aprovechamiento industrial y permanente de los tallos. Se puede realizar una selección controlada y permite mantener los guaduales como ecosistema importante dentro de la biodiversidad colombiana.

En Colombia se cuenta con la variedad más resistente de la *Guadua Angustifolia*, que, por su capacidad para soportar alto esfuerzo de compresión, flexión y tracción, y por sus demás cualidades físicas. Por otra parte, la variedad “macana” se presta más para la transferencia de cargas.

Se concluye que todo ingeniero al comprar el material para la construcción de Puentes u otra obra donde el material principal sea la guadua, el suministrador debe certificar el pedido de una ficha técnica donde contenga:

- Que la guadua fue cortada con edad entre 4 y 5 años.
- Que la guadua estaba en un estado de madures optimo es decir hecha.
- Que la guadua se dejó avinagrar en la mata durante 21 días.
- Que la guadua fue preservada por inmersión con pentavorato al 6%.
- Que la guadua fue secada en planta de secado hasta adquirir un contenido de humedad CH entre el 18 y el 20% .

Que además la guadua cumple con las condiciones solicitadas en la NSR-10, en especial en el G.12 y artículo G.12.6.2, Requisitos de calidad para las estructuras en guadua.

Además, debe cumplir con los requisitos establecidos en el numeral G.12.12.4.7 protección contra sismos, G.12.12.4.8 protección contra vientos, G.12.12.4.9 montaje

⁷ Ospina S., Decano de la facultad de ciencia ambientales U.T.P. Michael Tistl Asesor de proyecto U.T.P – GTZ/GOPA. “Guía para la Construcción de Puentes en Guadua”.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

y así sucesivamente hasta el G12.12.4.10 mantenimiento. De esta manera se garantiza el cumplimiento del diseño de puente en guadua.

3.3 PROPIEDADES FÍSICOMECAÑICAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA

Se realizó la consulta la Norma Técnica Colombiana NTC-5525 la cual nos indica los métodos de ensayos para determinar las propiedades físicas y los factores mecánicos de la guadua angustifolia kunth.

En esta norma se encuentra: La descripción general de la norma NTC-5525, los términos y las definiciones, símbolos y términos abreviados, organización y uso se esta norma, toma de muestras y almacenamiento de las probetas, contenido de humedad, densidad, contracción, compresión, flexión, corte, tensión, bibliografía y documentos referencia.

Para realizar estos ensayos se debe seguir las recomendaciones del título 5, “Toma de muestras y almacenamiento de las probetas”, es decir:

- Toma de muestras. La guadua se debe:
Para comercio: Se debe tomar un numero representativo de muestras de diferentes localidades, con diferentes condiciones de sitio teniendo en cuenta toda la distribución geográfica de la especie.
- Sección:
Los culmos de Guadua angustifolia Kunth se deben seleccionar de diferentes rodales en pie, por una persona calificada que pueda identificar la especie y comprender las diferentes implicaciones involucradas en el trozado y en el ensayo. Siempre que sea necesario y conveniente, el responsable del ensayo debe inspeccionar la localidad antes del corte.

Para ensayos comerciales, los culmos deben representar la población total que se va a utilizar con propósitos de construcción, incluso si toda la población tiene algunos inconvenientes. Los culmos quebrados, deteriorados o descoloridos se deben desechar.

El número de culmos requeridos para los ensayos se debe tomar, en forma aleatoria, de los diferentes rodales y parcelas. Para los ensayos comerciales, estos deben tener el mismo estado de maduración.

Inmediatamente después de la selección, el culmo en pie se puede marcar, preferiblemente con una “T”, a la altura del pecho y se debe informar al responsable del ensayo sobre la localidad, de manera que se pueda ubicar fácilmente para futuras instrucciones.

- Corte, Rotulado y Trozado
Antes del corte, se debe marcar un anillo a la altura de un metro desde el suelo, con pintura blanca o negra, y se deben registrar los siguientes datos: Nombre



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

(botánico y local), nombre de la localidad, cantidad de rodales y culmos seleccionados, estado de madurez de los culmos, detalles acerca de marcas y defectos en los culmos, número de entrenudos entre el suelo y el anillo de pintura, fecha de corte y despacho, nombre y firma del responsable del corte, rotulado y trozado.

De igual modo, antes del corte, cada culmo se debe identificar a una distancia aproximada de 0,25 m por encima del anillo de pintura; si se usan los dígitos 6 ó 9, se deben subrayar.

Los culmos se deben cortar de acuerdo con la NTC 5300 y la normatividad ambiental local, conservando el anillo de pintura sobre el culmo cortado. Una vez derribado el culmo, se deben marcar las partes que serán usadas para los ensayos. Las partes que se van a usar se deben marcar con un anillo en el extremo inferior y la identificación de los culmos se deben repetir en cada una de las partes. También se debe añadir identificación con relación a la posición del segmento en el culmo, “inferior”, “medio” o “superior”, cada uno constituyendo 1/3 de la porción utilizable del culmo. Se debe registrar la altura, en metros, de esos segmentos a partir del nivel donde el culmo fue cortado. Solo entonces se debe proceder a trozar el culmo en partes.

- Despacho

Es recomendable que el material se despache tan pronto como sea posible, preferiblemente en un lapso de dos semanas después del corte. En los casos en que no sea posible enviar el material inmediatamente, este se debe almacenar en un lugar a la sombra, protegido de la lluvia y sin contacto con el suelo. Si existe riesgo de agrietamiento, los extremos se pueden recubrir con alquitran de hulla, cera de parafina, barniz o cualquier otro recubrimiento apropiado.

Si el propósito de los ensayos es comercial, los especímenes se deben ensayar en condiciones de aire seco. Debido a que, muchos países, la guadua es muy susceptible al ataque de agentes destructivos puede ser necesario un tratamiento profiláctico para mantenerla intacta durante el despacho, tránsito y almacenamiento.

El despachador debe volver a revisar todos los detalles del envío particular y firmar y fechar tal envío. Los detalles se deben adjuntar a los documentos del envío.

- Recepción y almacenamiento de los culmos de guadua

En el momento en que el responsable se la prueba recibe el material, debe revisar las particularidades de la identificación de los diferentes culmos y debe conservar un registro apropiado.

Los culmos de guadua se deben almacenar durante un periodo lo más corto que sea posible, de modo tal que no se produzca deterioro.

- Rotulado y trozado en probetas



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Se deben cortar probetas para los diferentes ensayos y se deben rotular adecuadamente (número del proyecto, número del envío, cantidad de culmos, etc.) para la completa identificación de cada probeta.

La secuencia de ensayos debe ser de tal forma que elimine, en la medida de lo posible, los cambios debidos al almacenamiento y a las condiciones climáticas que pueden afectar la comparación de los resultados.

La cantidad de probetas para cada ensayo no deben ser inferior a doce.

- Informe del ensayo

El informe del ensayo debe incluir la siguiente información: Nombre y dirección del laboratorio, fecha del ensayo, y nombre del responsable del ensayo. Referencia a esta NTC y a las normas nacionales aplicables. Detalles de los especímenes de ensayo, como se menciona en el numeral 5.3. Temperatura y humedad del aire en el laboratorio. Equipo utilizado y toda información que pueda influir en el uso de los resultados del ensayo. Resultados del ensayo, incluyendo los valores del contenido de humedad y la densidad, las dimensiones antes del ensayo, los módulos y/o valores de resistencia, el módulo de falla y otra información adicional que pueda influir en el uso de los resultados del ensayo (por ejemplo, posición a lo largo del culmo). Detalles sobre el tratamiento estadístico de los resultados del ensayo, incluyendo los métodos y los resultados obtenidos; la exactitud de un valor medio debe ser la mitad de la desviación estándar y la exactitud de una desviación estándar debe ser la mitad de su propia desviación estándar. Datos sobre el ajuste a un contenido de humedad del 12%, si aplica.⁸

Además, se hace una descripción del capítulo “Toma de muestras y almacenamiento de las probetas”. De primera medida describe como se deben tomar las muestras, el proceso de selección, las recomendaciones de corte, rotulado y trozado, despacho de la guadua, recepción y almacenamiento de los culmos de la guadua, rotulado y trozado en probetas y el informe del ensayo.

Se especifica los ensayos físicos que se le puede realizar a la guadua, es decir:

- Contenido de humedad: Esta sección especifica un método para determinar el contenido de humedad de la guadua angustifolia para los ensayos físicos y mecánicos.
- Densidad: Esta sección especifica un método para determinar la densidad (masa/volumen) de la guadua para los ensayos físicos y mecánicos.
- Contracción: Esta sección especifica un método para determinar la contracción de culmos completos de guadua.

⁸ Norma Técnica Colombiana NTC 5525. 26 septiembre 2007. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua angustifolia kunth. Bogotá, Colombia. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (INCONTEC).



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Como ensayos mecánicos de determinan los siguientes:

- Compresión: Esta sección específica un método para los ensayos de compresión axial en probetas de culmos de guadua angustifolia kunth.
- Flexión: Esta sección específica un método para los ensayos de flexión en los culmos de guadua.
- Corte: Esta sección específica un método para los ensayos de corte paralelo a las fibras en probetas de culmos. de guadua angustifolia kunth.
- Tensión: Esta sección específica un método para los ensayos de tension paralela a las fibras en una sección longitudinal tomada de culmos. de guadua.

Se puede decir que, para obtener valores exactos del lote del material, se debe realizar los ensayos que se describen en esta norma NTC-5525. Como resultado de estos ensayos se obtiene los módulos de elasticidad y por otra parte las propiedades de resistencia mecánica (esfuerzos admisibles) que son empleadas en el proceso de diseño. Con la realización de este ejercicio se espera la mayor precisión de datos para el módulo de elasticidad y resistencia mecánica (esfuerzos admisibles), este último indispensable para el diseño estructural. A continuación, se observa **Fotografía 1** y **Fotografía 2** la probeta para el ensayo a compresión axial y perpendicular a las fibras respectivamente y **Fotografía 3** la probeta para el ensayo a tensión.

Fotografía 1: Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a compresión axial. Fuente: Luna P. Lozano J. Takeuchi C. A.A. Guías de diseño para estructuras de Guadua Angustifolia Kunth. Guadua y su industria. Pg. 129



Fotografía 2: Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a compresión perpendicular a la fibra. Fuente: Fuente: Luna P. Lozano J. Takeuchi C. A.A. Guías de diseño para estructuras de Guadua Angustifolia Kunth. Guadua y su industria. Pg. 129

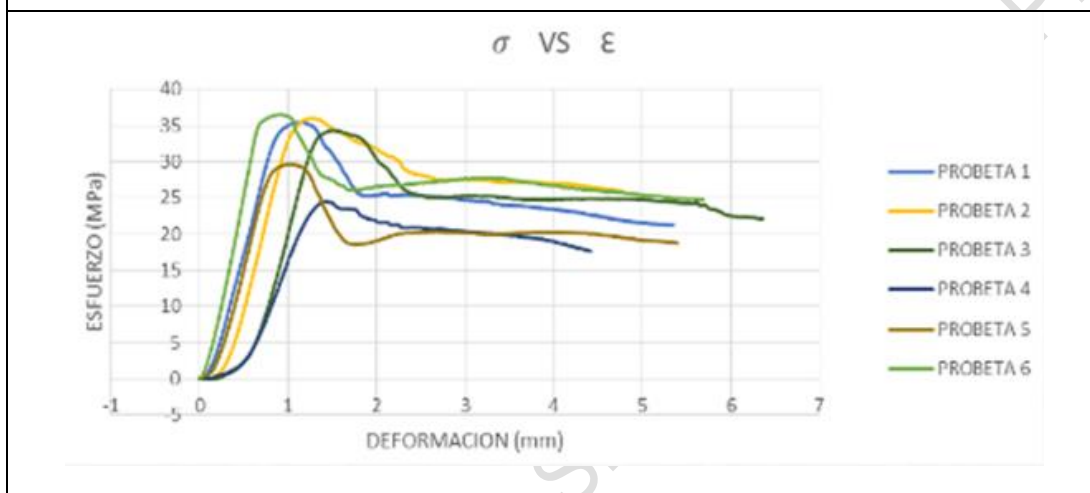




METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Como se puede observar en la **Figura 1** las curvas 1, 2, 3, 6 tienen un comportamiento similar en cuanto a su esfuerzo a compresión axial máximo soportado, para el caso de la probeta 4 y 5, se nota una considerable desigualdad en sus esfuerzos máximos soportados a comparación de las 4 inicialmente mencionadas.

Figura 1: Grafica ilustrativa curva esfuerzo deformación ensayo a compresión. Fuente: Rua E. Villamizar N. Gonzalez L. Aperato A. A.A. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la guadua angustifolia kunth como material estructural. Pg. 5.



En la **Figura 2** se observa la curva esfuerzo deformación de la guadua para el esfuerzo a tensión, esta grafica se compone de tres propiedades, modulo e elasticidad, módulo de ruptura y esfuerzo limite. Las gráficas de estos ensayos pueden variar debido a que el material de la guadua angustifolia kunth por ser un material natural sus diámetros no son homogéneos.

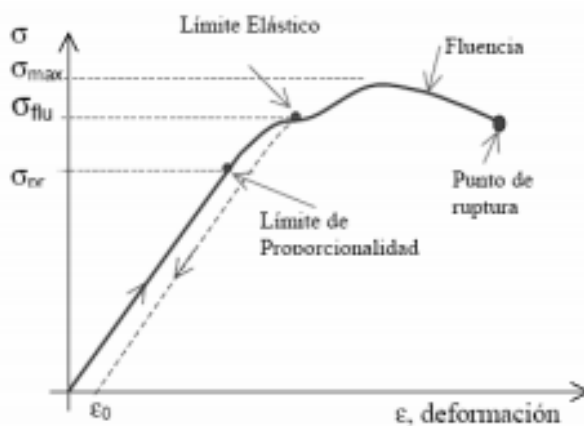


METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 3: Probeta de guadua angustifolia kunth ensayo a flexión. Fuente: Sapuyes E. Osorio J. Takeuchi C. Duarte M. Erazo W. junio 2018. Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua Angustifolia kunth de Pitalito, Huila. Revista de investigación, Vol 11. Pg 102.



Figura 2: Curva esfuerzo deformación ensayo a tensión. Fuente: González H. Montoya H. bedoya j. 2007. Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie Guadua Angustifolia Kunth, Scientia et Technica Año XIII, Universidad tecnología de Pereira. Pg. 504.





4. ESTADO DEL ARTE

El objetivo de este capítulo es enseñar y relacionar la información publicada en los libros y consultas digitales acerca de la metodología que se ha implementado alrededor del mundo para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua.

Se encontró que la revista Journal of Bridge Engineering publicada por American Society of Civil Engineers, Structural Division en septiembre 2010. El artículo menciona lo siguiente: “Los escritores están llevando a cabo un programa de investigación integral, con el objetivo de desarrollar estructuras modernas de bambú para edificios y puentes. Este documento informa sobre el diseño, la construcción y las pruebas de los modernos puentes de bambú. Las vigas de bambú laminadas o glubam se desarrollaron y verificaron para un rendimiento mecánico satisfactorio a través de pruebas a gran escala”.⁹

Por otra parte, conforme al tipo de diseño geométrico de las estructuras se relaciona la evolución de los puentes en guadua y sus antecedentes, estos construidos en Colombia y alrededor del mundo.

4.1 LITERATURA NACIONAL

1. Puente de los indígenas Paeces en el municipio de Tierradentro en el departamento del Cauca. Este puente es colgante y se suspende en una larga cuerda principal, los puentes atirantados distribuyen la carga de la plataforma con varias tirantas. Este puente tenía 40 metros de longitud. La guadua trabaja de forma atirantada y con tallos de arco natural desde cada orilla. Este fue puente construido en 1621. Como se observa en la **Fotografía 4**.

⁹ Journal of Bridge Engineering, Septiembre 2010, Structural Division. Ppublicada por American Society of Civil Engineers.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 4: Puente de los indígenas Paeces en el municipio de Tierradentro en el departamento del cauca. Construido en el año 1621. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.



Puente de guadua de la provincia de Neiva, municipio de la Plata. Este puente es de tipo atirantado. Como se observa en la **Fotografía 5**.

Fotografía 5: Puente de guadua de la provincia de Neiva, municipio de la Plata. Fuente: Puente de guaduas sobre el río de la Plata, frente a la ciudad, provincia de Neiva Manuel María Paz, 1857 Comisión Corográfica Biblioteca Nacional de Colombia.



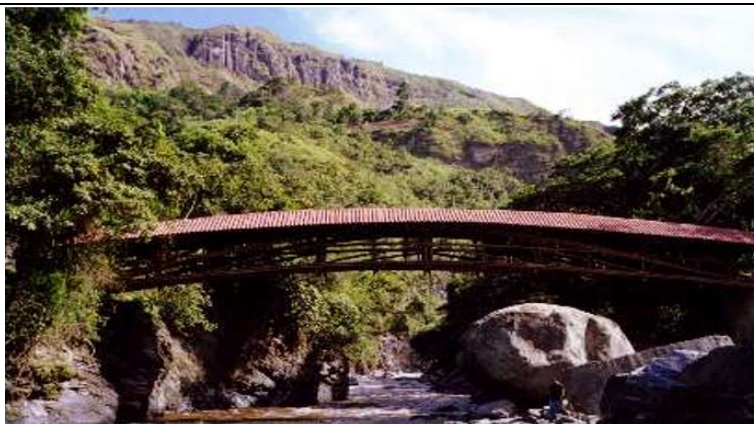


METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

2. Listado de puente de Jorg Stamm, se relaciona la ejecución de puentes nacionales.

- Municipio de Tierradentro en el departamento del Cauca. Puente tipo Hove con arco de carga y arco de piso. Construido en 1995, Este puente tiene una luz de 35 metros. Como se observa en la **Fotografía 6**.

Fotografía 6: Puente en el municipio de Tierradentro en el departamento del Cauca, construido en 1995. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.



- Diseño y construcción de dos puentes peatonales, 12 y 22 m en guadua y madera, para la NASA KIWE, (la avalancha de río Paez,). Cálculos estructurales con el instituto de estructuras en madera Dr. Führer, Universidad RWTH Aachen, Alemania. Trabajos en guadua y madera. Gerente de ECOTAL Ltda. Popayán.
- Diseño y construcción de puente en guadua 17 m, Suarez. Fecha de ejecución julio 1996.
- Diseño y construcción de tres (3) Puentes en madera de 20 m de longitud en la “Bota Caucana”. Programa Plante/Gobernación Cauca. Puente en Guadua 18m “La Cedralia, Inza, Nasa Kiwe”. Fecha de ejecución diciembre 1997.
- Puente ubicado en la Universidad Tecnológica de Pereira. Se construyó en el año 2000. Este puente cuenta con un arco de guadua, una cercha y diagonales atirantados contra cargas asimétricas. El puente cuenta con una luz de 40 metros, el piso debe garantizar un galibo de 5 metros. Se le realizaron pruebas de carga moderada, con 250kg/m², bajo el arco por solo un máximo de 4 cm y se recuperó 3,8 cm. Esta deformación permanente está causada por el apretón de las fibras en contacto con la rosca de los pernos. El puente también sobrevivió un impacto lateral con una volqueta, - sin consecuencias. Como se observa en la **Fotografía 7**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 7: Puente ubicado en la UTP se construyó en el año 2000. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.



- Puente en bambú ubicado en el Colegio Liceo Francés de la ciudad de Pereira. Este contiene una luz de 52 m, su construcción se realizó en Septiembre 2001, Como se observa en la **Fotografía 8**.

Fotografía 8: Puente en bambú ubicado en el Colegio Liceo Francés, su construcción se realizó en Septiembre 2001. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.





METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Puente en bambú ubicado en la Ciudad de Pasto en el departamento de Nariño. Este puente es tipo Hove con arco de carga y arco de piso. Construido en 2005. Como se observa en la **Fotografía 9**.

Fotografía 9: Puente en bambú ubicado en la Ciudad de Pasto en el departamento de Nariño, Construido en 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.



- Diseño y construcción de un puente de 30m con techo en membrana arquitectónica. Este puente se ubica en la ciudad colombiana de Cúcuta. La combinación del material natural y tradicional con una membrana industrial resultó un reto. Las torres conformadas por paquetes de 5 y 6 guaduas se elevan de forma piramidal sobre 4 puntos de apoyo. Encima se colocaba una *Campana* de acero que recibe los cables que templan la lona. Las tirantas son de dos varas, unidas por pernos axiales y perpendiculares, los canutos bajo carga tienen *grouting* en cemento. El arco está compuesto por 6 guaduas, estabilizadas por tirantas. Las primeras “tirantas” son en verdad compresores de una torre, que adicionalmente se retiene con el cable que tensiona la membrana.

Las construcciones con membranas necesitan tener en cuenta la fuerza del viento. Estas enormes carpas pueden convertirse en velas con fuerzas amenazadoras. Para evitar este peligro se temple la superficie en dos curvas opuestas. La membrana de PVC reforzado con fibra de vidrio cuenta con una capa de teflón contra la suciedad y el hollín de los motores. Esta tecnología es nueva, muy contemporánea, pero también muy exclusiva: Este techo costó más que la estructura del puente.

La membrana de 400m² permite la protección contra sol y agua. Su cableado está activamente incorporado a fijar la estructura de las torres y usa el piso cerca del centro como contrapeso. A pesar que el sol de la mañana golpea la campana, la guadua en la punta son protegidas por la sombra de la carpa a medio día. La guadua cuenta con una pintura de poro abierto, a base de linaza, con ingredientes antifungal (sustancia que tiene la capacidad de evitar el



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

crecimiento de algunos tipos de hongos) y anti – UV (proteje rayos del sol). Este puente fue construido en julio 2008. Como se observa en la **Fotografía 10**.¹⁰

Fotografía 10: Puente peatonal construido en la ciudad de Cúcuta, Colombia. En julio 2008. Fuente Jacome J. 2014. El puente de Guadua Arnulfo Briceño.



- Este puente de 46 metros de luz muestra los dos arcos con mucha claridad, la estabilización se ejerce mediante una estructura espacial, incorporado al techo amplio de 14 metros de anchura. Este se ubica en la localidad de Engativá en la ciudad de Bogotá, en la troncal de la calle 80. Conecta la ciudad con zona rural. Fue construido en el año 2003. Ver **Fotografía 11**.¹¹

¹⁰ Carmiol V., “Bambú Guadua en puentes peatonales”, Tecnología en Marcha, Vol. 23, N° 1, P. 29-38, enero-marzo 2010.

¹¹ Redacción el tiempo, Bogotá ya tiene su puente de guadua, 31 diciembre 2003. Recuperado de: <https://www.eltiempo.com>



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 11: Puente de guadua conocido como “Jenny Garzón”. Este puente se ubica en la localidad de Engativá en la ciudad de Bogotá, en la troncal de la calle 80, conecta la ciudad con zona rural. construido 2003. Fuente: Industria, Energía y Medioambiente. 2016. El puente de guadua de la ciudad de Bogotá.



- Puente sobre el río Cali. Estructura en Guadua Angustifolia para puente de 35 metros de luz libre sobre el río Cali, en las inmediaciones de los barrios Santa Teresita y Santa Rita en Cali, Colombia. Se construyó en el año 2004. Como se observa en la **Fotografía 12**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 12: Puente Fundeguada, se construyó sobre el río Cali, en el año 2004. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.



- Construcción de un Puente de 30m. La estructura pesa solo 8 toneladas y fue llevado integro por una grua móvil del sitio de ensamble a los estribos. La operación duro solo 2 horas, el puente se ejecutó en solo 4 semanas con taller teórico práctico en Santa Fe de Antioquia, con Sr. Hellmut Luecker de Bamboo Technologies y la alcaldesa. Septiembre 2005. Como se observa en la **Fotografía 13**.

Fotografía 13: Puente ubicado en Santa Fe de Antioquia, construido en Septiembre 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.





METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Puente ubicado en Santo Domingo Medellín. Contiene una luz de 60m. Este puente de guadua comenzó a concebirse en 2005, gracias a un convenio establecido entre El Sena y la Alcaldía de Medellín, a través de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU). La primera entidad se encargaría de la gran estructura, gracias a la labor de sus aprendices, y la segunda, haría las fundaciones. En 2008, la Regional Quindío del Sena inició labores. Este puente colapso debido a que no se realizó un adecuado diseño estructural, debido a las deformaciones y el mantenimiento, hizo que la cubierta se desplomara. Como se observa en la **Fotografía 14**.

Fotografía 14: Puente ubicado en Santo Domingo Medellín, fue construido en el 2008. Fuente: Sánchez D., 2013. Medellín: el puente de guadua que también colapsó.



- Puente ubicado en el corregimiento de Mulaló, municipio del Valle del Cauca. Contiene una luz de 20 metros. Puente con geometría tipo Hove con arco de carga y arco de piso, tipo colgante. Construido en el año 2005. Como se observa en la **Fotografía 15**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 15: Puente ubicado en el corregimiento de Mulaló, municipio del Valle del Cauca. Construido en el año 2005. Fuente: Stamm J., 2005. Curso de construcción de puentes en guadua.



- Puente en proceso de ejecución. Puente poliédrico para construir en la Universidad Tecnológica de Pereira. Como se observa en la **Fotografía 16**.

Fotografía 16: Puente en proceso de ejecución, puente poliédrico para construir en la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2016. Universidad Tecnológica de Pereira





4.2 LITERATURA INTERNACIONAL

- Puente de Guanezhoua, Ubicado en la reserva de la montaña Nankun en la provincia de Guangong. Su longitud es de 38 metros, diseño y construcción de Arquitecto Simón Vélez. Año de construcción 2005. Ver **Fotografía 17**.

Fotografía 17: Puente de Guanezhoua, Ubicado en la reserva de la montaña Nankun en la provincia de Guangong. Año de construcción 2005. Fuente: Ochoa R. Real Estate Market & Lifestyle. Simón Vélez y Acero Vegetal.



- Puente ubicado en Davao Filipinas. Diseñado por Andrea Fitrianto y consultores Joeffry Camarista & Evtri Tabanguil (fundación), Natalia Dulcey, bamboo networks, periodo de construcción de abril a Mayo en el año del 2011, como se observa en la **Fotografía 18**.¹²

¹² Franco J., 8 enero 2013. Puente Peatonal de Bambú es construido por la comunidad de Davao, Filipinas. ArchDaily Colombia. Recuperado 3 Oct 2015. <http://www.archdaily.co/co/02-224355/puente-peatonal-de-bambu-es-construido-por-la-comunidad-de-davao-filipinas>



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 18: Puente ubicado en Davao Filipinas, periodo de construcción de abril a mayo en el año del 2011. Fuente: Franco J., 2013. puente peatonal de bambú es construido por la comunidad de Davao en Filipinas.



- Puente ubicado Sibang Kaja, Bali. Cliente Escuela Verde, superficie de 70 m², se empleó materiales de bambu en la estructura de 5000m, longitud de 23 metros, construido por Jorg Stamm, en diciembre 2011, como se observa en la **Fotografía 19**.

Fotografía 19: Puente ubicado Sibang Kaja, Bali, construido en diciembre 2011. Fuente: Hahim A. 2007. The Green School. PT Bambu.

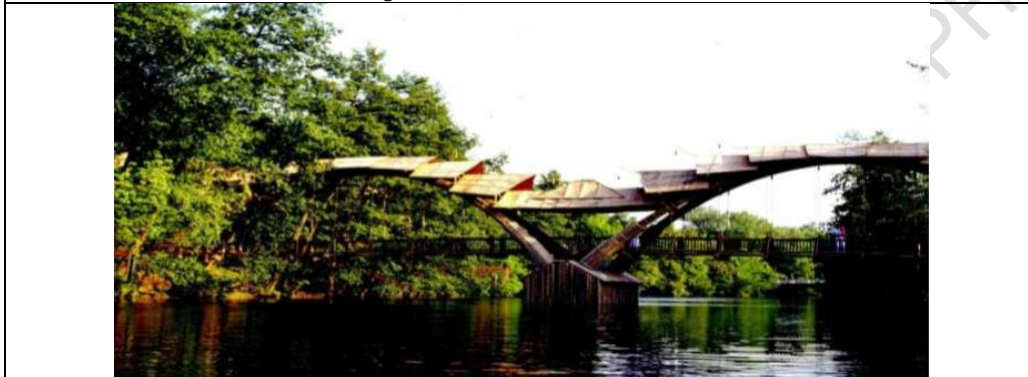




METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Puente peatonal en bambú en bietigheim bissingen Alemania, como se observa en la **Fotografía 20**.

Fotografía 20: Puente peatonal en bambú en bietigheim bissingen Alemania. Fuente: Gonzalez S., Holzbrücke / Bridge made of wood.



- Puente peatonal ubicado en Sumatra Indonesia. Su longitud es de 37 metros. Ver **Fotografía 21**.

Fotografía 21: Puente peatonal en Sumatra Indonesia, longitud de 37 metros. Construido en 2017. Fuente: Puente de carretera de Bambu, 2017. Fibra Awar





5. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA

El método de diseño que se usará en este trabajo de grado será por esfuerzos admisibles, tomadas de la Guía de Especificaciones para el Diseño de Puentes Peatonales de la AASHTO 1997, y en su Tabla 3 combinaciones de cargas de servicio para esfuerzos admisibles y Reglamento colombiano de construcción sismoresistentes NRS-10 para el cálculo de elementos del Título G-12. Este análisis se realizara con el software SAP2000.¹³

5.1 PRELIMINARES

5.1.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Se lleva a cabo para determinar la posición relativa entre varios puntos sobre el plano horizontal en el terreno, es decir mediante planimetría. Para así poder determinar la altura entre varios puntos del plano horizontal (Cartografía). Estos pueden ser los 3 tipos de levantamientos a realizar:

- Catastrales: Son un registro estadístico para determinar la extensión geográfica y riqueza de alguna demarcación y que en materia hacendaria es un apoyo para determinar el cobro de las imposiciones del estado, según lo manifestado en los registros.
- Urbanos: Los levantamientos topográficos urbanos o levantamiento de planos, se realizan en propiedades pertenecientes a municipios, siendo requerida una mayor precisión en la medición. Suelen requerirse por un arquitecto, inmobiliaria, etc., para **conocer las medidas exactas de una vivienda** o edificación.
- Para proyectos de ingeniería: el uso de este método es su utilización **para el establecimiento de las bases de partida de proyectos** de ingeniería, sobre todo relacionados con la construcción de infraestructuras, siendo de uso requerido por ingenieros, arquitectos y constructores.
- Se recomienda hacer el levantamiento topográfico con curvas de nivel cada 0.50 m para mejorar la información de campo para realizar el diseño arquitectónico y estructural de los puentes.

Se realiza con el fin de saber las condiciones del terreno y el replanteo del mismo. En la **Figura 3** se observa el plano del levantamiento topográfico.

¹³ Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 19 marzo 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Bogotá, Colombia.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 3: Levantamiento topográfico. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.



5.1.2 DOCUMENTOS DE LOCALIZACIÓN DEL PUENTE

Se debe tener en cuenta:

- Estudios de suelos, el objetivo principal del estudio de suelos es realizar el cálculo de la capacidad de carga del terreno mediante las propiedades físicas determinadas en el laboratorio, para aplicarlas en los cálculos estructurales de la cimentación del proyecto.
- Planos arquitectónico, es el documento que refleja el estado actual del territorio, las características geográficas y usos genéricos del medio natural, las infraestructuras y servicios existentes y las obras en curso.
- Puntos de referencia de los alrededores. Estos ayudaran a dar unas características de localización más exactas, indicando desde la temperatura de la zona, hasta las características de la microzonificación. Según decreto, parámetros de diseño sísmico y eólico.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

5.1.3 PRE DIMENSIONAMIENTO ARQUITECTÓNICO

Se realiza una vez hecho el levantamiento topográfico y el replanteo del terreno ya que lo que se busca es encontrar unas dimensiones orientativas de la estructura del puente para poder iniciar con el diseño. Todo esto con ayuda de un arquitecto y un diseñador. En este pre dimensionamiento arquitectónico consideramos estos aspectos determinantes:

- a) Determinantes arquitectónicos: Luz a salvar con el puente peatonal, Definir los accesos y definir el gálibo del puente.
- b) Determinantes físicos: Intensidad de lluvias, humedad relativa de la zona y brillo solar.
- c) Definición geométrica del puente.

5.1.4 DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Una vez definido los determinantes del pre dimensionamiento se procede a elaborar el diseño definitivo del arquitectónico, como son: Luz del puente, gálibo, Ancho de tablero, localización de barandas, geometría, altura, ancho y descanso en los accesos, y finalmente determinar si el puente requiere cubierta.

Determinación del confort de los peatones, por ejemplo; sillas de descanso y observación, áreas sociales y cafeterías. En la **Figura 4** **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **Figura 5** se observa un ejemplo de un plano del diseño arquitectónico. Se puede apreciar el confort de los puentes peatonales por la instalación de sillas de descanso, áreas sociales, cafetería y zonas verdes.

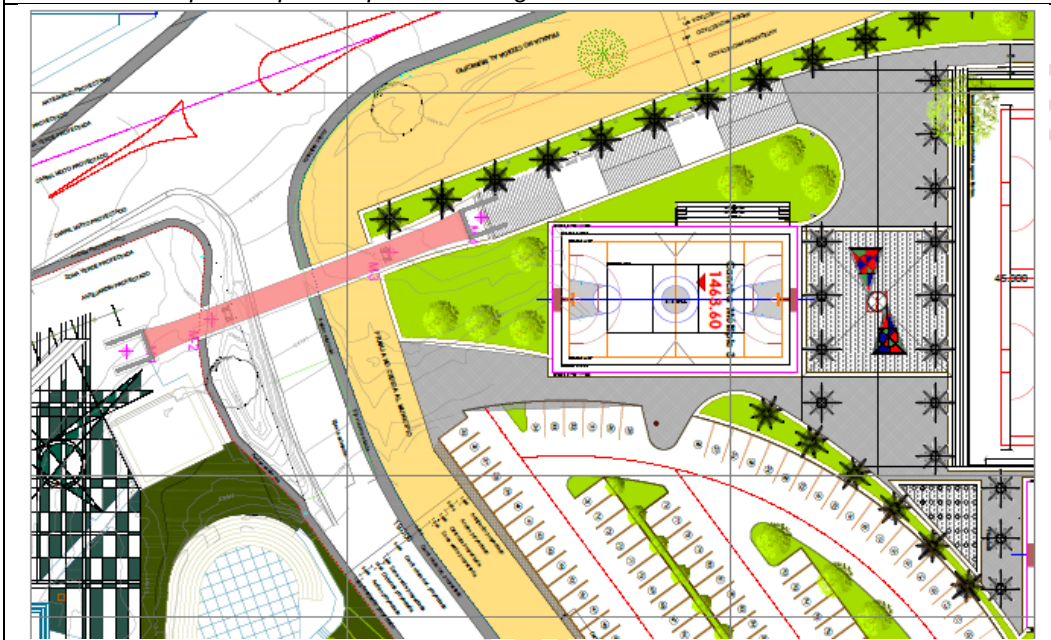
Figura 4: Diseño Arquitectónico de un puente moderno. JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.





METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 5: Diseño Arquitectónico. JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.



5.1.5 PREDIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL EN 3D

Se debe tener en cuenta las necesidades de una comunidad para saber exactamente qué tipo de puente se va a pre dimensionar, teniendo en cuenta que se necesita saber:

- Luz máxima a la cual debe diseñarse el puente.
- Amplitud de la flecha a emplear.
- Tipo de uniones a emplear.
- Tipo de puente ya sea colgante o no, teniendo en cuenta su diafragma.
- Tipo de estribo a emplear con sus dimensiones.
- El galibo del puente en el sitio proyectado

Una vez claros esos parámetros se procede a plasmar en AutoCAD las ideas y necesidades logrando crear así un modelo con el cual se va a trabajar, Existe un criterio principal a tener en cuenta y es lograr que la estructura sea sismoresistentes, para que esto se logre se debe cumplir lo siguiente:

- Definir una geometría de las más usuales en puentes como se muestra en **Figura 6**.
- Simplicidad y simetría. Entre más simple sea la estructura mejor se comportará ante un sismo.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Resistencia y ductilidad. Por lo menos en dos direcciones ortogonales o aproximadamente. Para así poder garantizar la estabilidad de la estructura como la de cada elemento que la conforma.
- Uniformidad y continuidad de la estructura. Debe ser continua tanto en planta como en elevación con elementos que no cambien exageradamente su rigidez, y así evitar la concentración de los esfuerzos.
- Elementos no estructurales.
- Cimentación. Teniendo en cuenta la transmisión del corte basal del puente al suelo.
- Estructuración. Buscando una ubicación apropiada de los distintos elementos resistentes de tal forma que el mismo puente sea autosuficiente y soporte todas las solicitaciones a las que estará sujeta durante la vida útil del puente.
- El criterio práctico y la experiencia adquirida al pasar del tiempo.

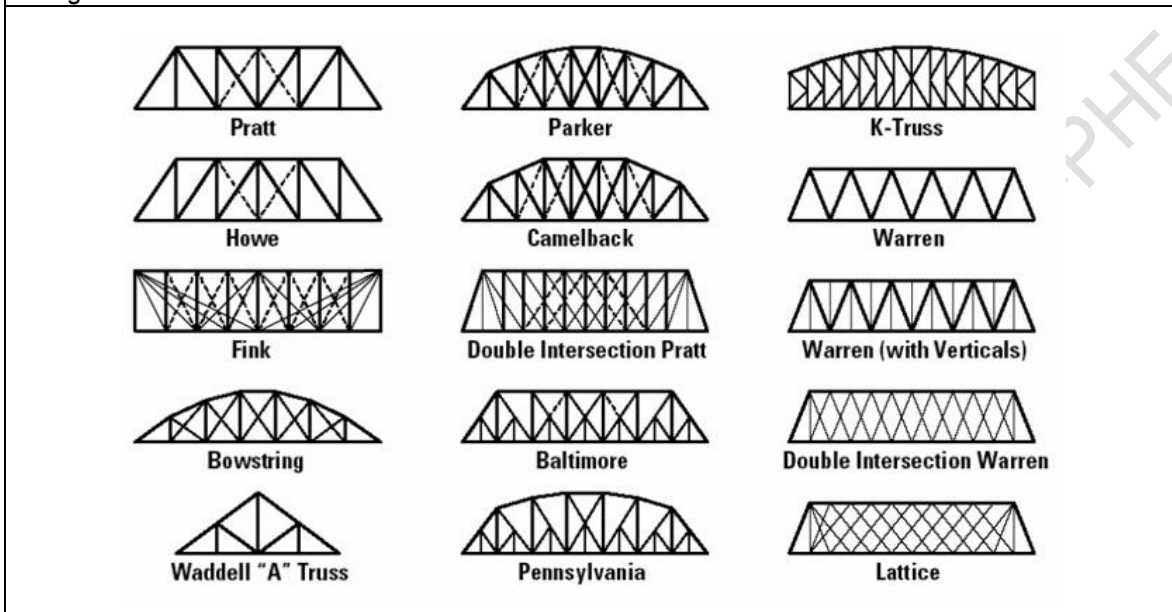
En la **Figura 6** se observan los tipos de geometrías que se pueden emplear para el diseño de puentes en guadua, la empleada para nuestro ejercicio fue combinación de Warren y Bowstring.¹⁴

¹⁴ Cadena F., Meraz L., Moreno F., y Maza F., 23 septiembre 2014. Tipos de Cercha. Recuperado de <https://es.slideshare.net/panchocadena/cerchas>



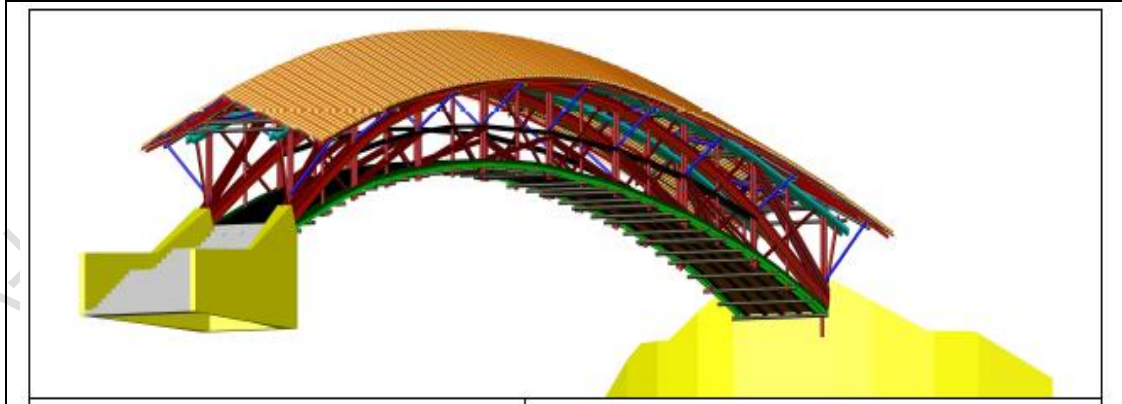
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 6: Geometrías algunos tipos de cerchas y armaduras para puentes peatonales en guadua. Gonzalez R., 28 marzo 2016. Análisis Estructural. “La solución es una necesidad: las cerchas en la ingeniería”. Prontubcam. 8va edición.



En la **Figura 7** se observan el modelo en 3D o vista isométrica, el cual es el predimensionamiento de puente en guadua el cual se va a diseñar para nuestro ejercicio.

Figura 7: Vista isométrica del predimensionamiento, Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.





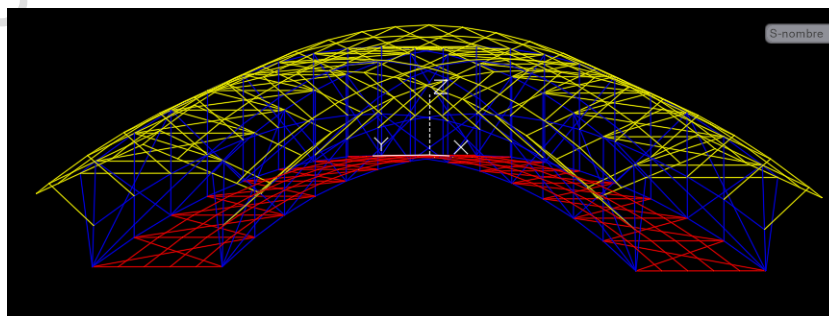
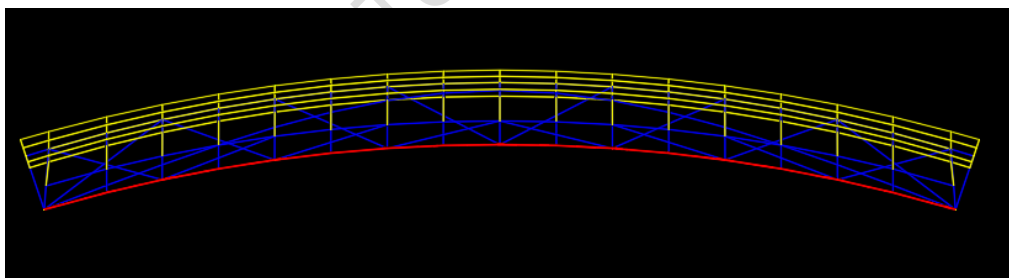
5.1.6 MODELO ALÁMBRICO

El modelo alámbrico del puente es una representación del esqueleto o de los lados en 3D a escala real mediante líneas y curvas. Los modelos alámbricos constan únicamente de puntos, líneas y curvas que describen las aristas del objeto. Dado que los objetos que conforman un modelo alámbrico deben dibujarse y ubicarse de forma independiente, es muy probable que la creación de este tipo de modelos requiera un tiempo superior a la de otros modelos. Utilizando estos modelos se puede:

- Ver el modelo desde cualquier punto de vista.
- Generar automáticamente vistas auxiliares y ortogonales estándar.
- Analizar relaciones espaciales, incluida la distancia más corta entre esquinas y lados y comprobar las posibles interferencias.
- Reducir el número de prototipos requeridos.
- Generar fácilmente vistas descompuestas.
- Generar vistas en perspectiva fácilmente.

En el modelo alámbrico para su exportación al software de elementos finitos SAP2000 se requiere tres (3) condiciones, así: 1. Que todos los elementos deben estar unidos en un mismo punto, 2. Que las coordenadas tridimensionales deben estar ubicadas en un punto de la estructura, y 3. De los Layers de los elementos deben ser diferentes a cero, como se observa en la **Figura 8**.

Figura 8: Modelo alámbrico, Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.





5.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural toma los criterios establecidos en algunos reglamentos nacionales y extranjeros¹⁵, los cuales se han dispuesto de tal manera que pueda haber una interacción adecuada entre ellos y permitan un análisis con el mayor grado de fidelidad con los fenómenos que puedan presentarse en la prestación del servicio del puente.

Para una mayor fidelidad de los resultados del análisis se ha hecho una modelación de la estructura diseñada utilizando el programa SAP2000, en su versión 16.0. Considerando que debido al material utilizado se ha hecho una disposición del mismo en formas y secciones que guardan cierto grado de complejidad. Se ofrece en este trabajo como solución una modelación simplificada del puente, pero asignando secciones transversales personalizadas que permitan una presentación realista del modelo en su estado final.

A continuación, se presenta el procedimiento para el diseño estructural del puente con base a las consideraciones resultantes de la investigación realizada y se detallará punto por punto. Cabe destacar que en este proceso se harán algunas comparaciones entre normativas estudiadas con el fin de sustentar de manera sólida las determinaciones que se tomen a la hora de llevar a cabo el proceso de análisis.

JUSTIFICACIÓN DEL USO DE COMBINACIONES DE CARGA:

El uso de combinaciones de carga utilizado en este proyecto se apoya en el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10), el cual justifica su uso bajo la condición de esfuerzos admisibles sobre los cuales recomienda trabajar como bien menciona en su sección G.12.6.1.1 para estructuras en guadua:

“Todos los elementos de guadua de una estructura deben ser diseñados, contruidos y empalmados para resistir los esfuerzos producidos por las combinaciones de cargas de servicio consignadas en B.2.3.1 del presente reglamento y las limitaciones deflexión estipuladas en G.12.8.9.”

Frente a lo expuesto, el Reglamento expone en la sección B.2.3.1 (segundo párrafo):

“En el presente Reglamento NSR-10, todos los materiales estructurales, con la excepción de la madera y guadua en el título G, se diseñan por el método de la resistencia y por lo

¹⁵ Para el análisis estructural se analizaron en esencia tres normas, dos de uso nacional como son: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 19 marzo 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Bogotá, Colombia. Ministerio de Transporte, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 2013. Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia. Como complemento a estos dos conjuntos de normas se añadió también el manual “AASHTO LRFD GUIDE FOR THE DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE” edición 2009. Se ha buscado una convergencia adecuada entre estas tres normas de tal manera que en consideración del material, uso y condiciones de servicio se aproximen de la mejor manera posible a las condiciones reales de prestación del servicio del puente como se podrá explicar más adelante.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

tanto las combinaciones básicas aplicables a los materiales estructurales prescritos en el reglamento y no deben utilizarse. Se incluyen para aquellos casos especiales en los cuales el diseño se realiza por el método de los esfuerzos admisibles y solo deben emplearse cuando así lo indique explícitamente el Título o sección correspondiente del Reglamento.”

El código colombiano de diseño sísmico de puente de 2014 por su parte, apoya su filosofía de diseño en el diseño por esfuerzos admisibles, el cual si bien aplica para materiales como el acero estructural y el concreto reforzado y postensado, no es posible extrapolarlo a la guadua por dos razones: la primera es que la guadua al igual que la madera funciona como un material con un campo plástico nulo viéndose obligado a trabajar con esfuerzos admisibles. La segunda razón radica en que contrario a la NSR-10, el CCP-14 no contempla unas combinaciones de carga que puedan utilizarse para este tipo de material. La sección 8 del CCP-14 dedicada para estructuras en madera omite los detalles apoyado en la escasa investigación presentada sobre el tema a nivel nacional. Por lo tanto y en consideración de los tipos de carga que se pueden aplicar a este tipo de proyecto, estudio del material y la aplicabilidad de Reglamento se opta finalmente por la NSR-10 para el desarrollo de este proyecto.

5.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE.

El procedimiento propuesto por este trabajo consistirá en los puntos que se detallan a continuación:

- **Definición geométrica del proyecto.** En este punto se toma el plano arquitectónico del proyecto y se simplifica de tal manera que tenga un aspecto alámbrico que permita su importación del programa de análisis (en este caso SAP2000). La modelación alámbrica facilita el proceso de diseño en el sentido de que reduce la complejidad del sistema estructural al reducir la cantidad de miembros y de nudos, y con ello eventuales problemas de estabilidad en la estructura, así como una reducción en el tiempo de análisis llevado a cabo en el programa. En la **Figura 9** y **Figura 10** se muestra un comparativo entre el plano estructural resultante del levantamiento comparado con el modelo matemático simplificado que se planea importar al programa de análisis.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 9: Vista en Perfil planos de Proyecto. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

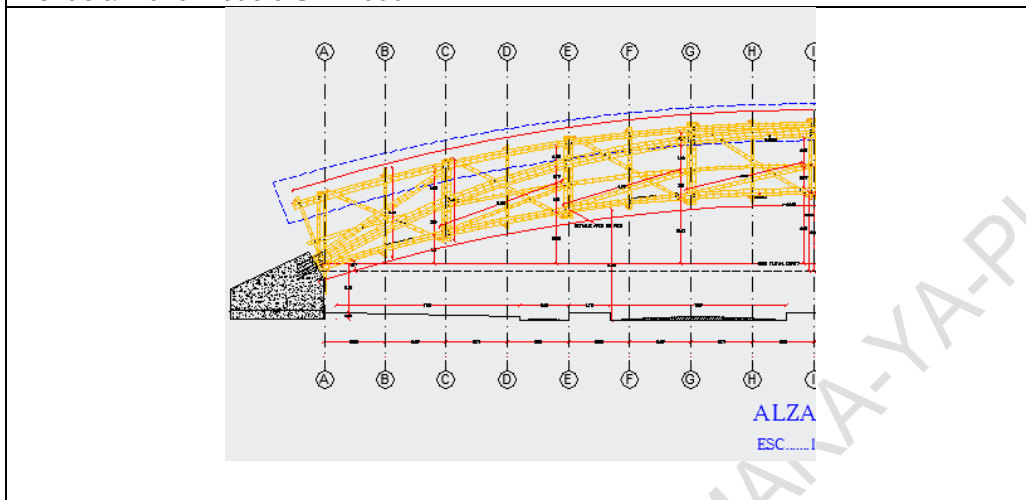
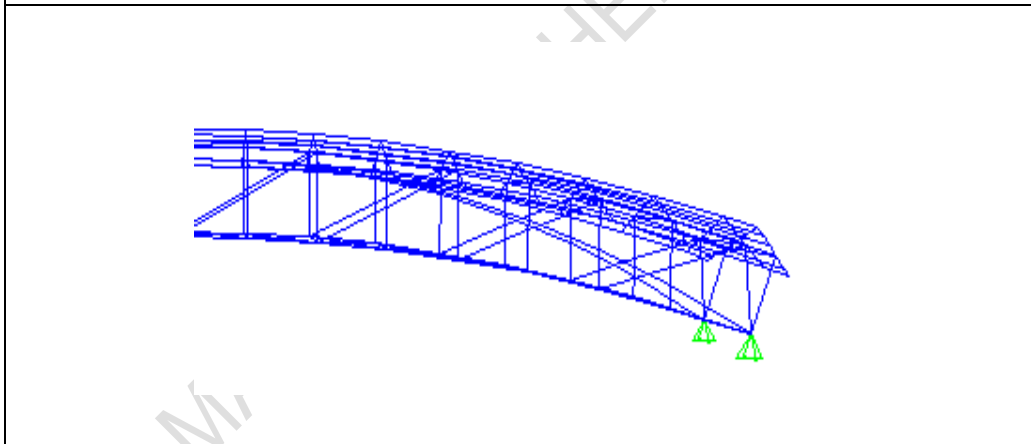


Figura 10: Vista en Perfil – Modelo en SAP2000. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.



5.2.2 MODELACIÓN DEL MATERIAL ESTRUCTURAL UTILIZADO.

Para el caso del material utilizado se debe tomar como referencia las propiedades mecánicas que se consideren válidas ya sean producto de una investigación previa del material utilizado o en su defecto las propiedades ya consignadas en Reglamentaciones vigentes. Al hacer un comparativo entre la NSR-10 y el CCP-14 se encontró que la primera posee información referente a las calidades del material, más exactamente las provenientes de la sección G.12. A continuación se muestran las propiedades mecánicas del material utilizado (guadua angustifolia kunth) representado en dos tablas, la primera presenta valores diversos de módulos de elasticidad, mientras que por otra parte la segunda muestra las propiedades de resistencia mecánica utilizados durante el proceso de diseño.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 1: Módulos de elasticidad de la guadua, tomados de la sección G.12.7.3 de la NSR-10, en MPa y con un contenido de humedad (CH) de 12%, Fuente NSR-10.

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo E_{min}
9500	7500	4000

Como bien indica la **Tabla 1**, sección G.12.7.3 de la NSR-10, los valores expuestos en la anterior se utilizan con diferentes propósitos. El módulo de elasticidad promedio se utiliza para el análisis de los elementos estructurales de la edificación o estructura. Por otro lado el módulo de elasticidad mínimo se utiliza con el fin de evaluar los coeficientes de modificación de las propiedades mecánicas del material en cuanto a estabilidad de vigas (C_L) y columnas (C_p). Por último, el módulo de elasticidad de percentil 5 se deberá utilizar con el fin de determinar las deflexiones cuando las condiciones de servicio sean críticas o requieran un nivel de seguridad superior al ofrecido por el promedio. Esto sugiere que para el caso de este tipo de proyecto se deberá hacer dos tipos de análisis: un primer análisis por fuerzas, utilizando el módulo de elasticidad promedio del material. El segundo análisis debe llevarse a cabo con el fin de determinar las deflexiones máximas y para esto se utiliza el módulo de elasticidad de percentil 5.

Tabla 2: Esfuerzos admisibles de la guadua con un (CH) del 12%, en MPa. Fuente: NSR-10.

Flexión (Fb)	Tracción (Ft)	Compresión paralela (F)	Compresión perpendicular (Fp)	Corte (Fv)
15	18	14	1.4	1.2

Contrario a como ocurre en materiales como el acero, la guadua presenta diferentes valores de resistencia dependiendo del tipo de esfuerzo al que se vea sometido. Esto obedece a que la guadua es un material que por la manera en que van dispuestas sus fibras (de manera paralela al eje longitudinal del culmo) ofrece diferentes niveles de resistencia según la dirección de carga que se aplique en relación al eje principal del material (en este caso el eje longitudinal), lo cual lo hace un material ortotrópico. Estos niveles de resistencia se deberán considerar al momento de realizar el diseño de la pieza. Ver **Tabla 2**.

5.2.3 MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y SECCIONES DE LOS ELEMENTOS EMPLEADOS EN EL PROYECTO.

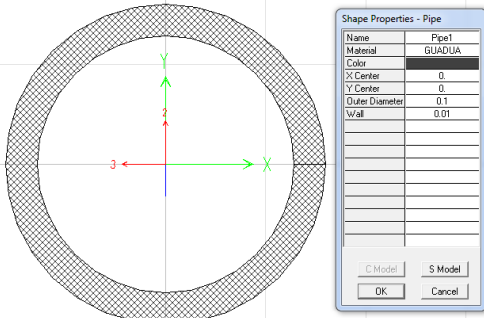
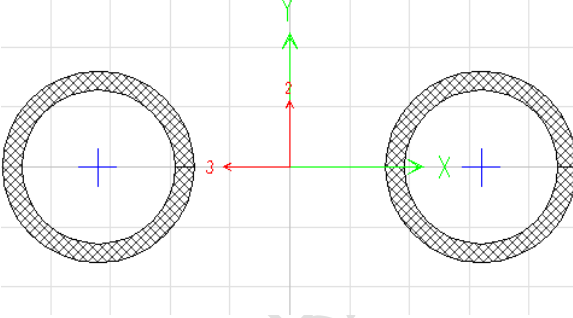
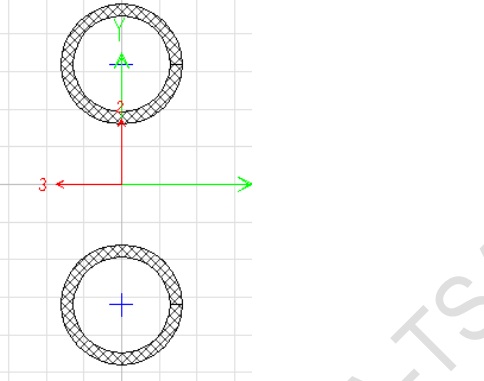
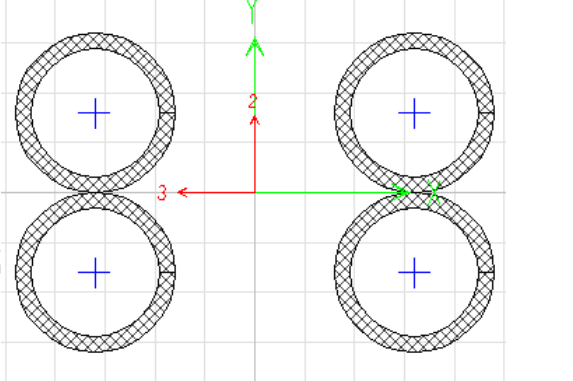
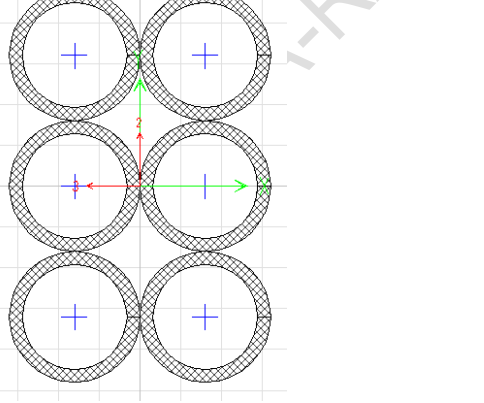
Como bien se mencionó en la sección 6.1.5.1.1, se busca crear una geometría del puente lo más sencilla posible de tal manera que se reduzca al mínimo tanto el tiempo como la probabilidad de que se presenten errores en el proceso de modelación. Ahora bien, este modelo matemático simplificado se compensa con la creación de secciones transversales que sean coherentes con lo que ofrezca el plano estructural del puente o la proyección inicial que ofrezca el profesional encargado de su diseño. El programa SAP2000 ofrece un diseñador de secciones, el cual permite la creación de estas secciones. A continuación en



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

la **Tabla 3** se muestran dos ejemplos de secciones personalizadas exclusivas de este proyecto y su asignación al modelo matemático generado en SAP2000.

Tabla 3: Modelación de secciones transversales personalizadas en SAP2000. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

 Culmo individual	 Dos culmos en horizontal
 Dos Culmos en Vertical	 Cuatro Culmos
 Seis culmos	

Cabe destacar que a cada perfil personalizado también se le asigna un material para definir con ello las propiedades mecánicas que presenta la sección. Por tanto, es necesario definir las propiedades mecánicas del material con los valores expuestos en el numeral anterior.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

5.2.4 DEFINICIÓN DE LAS COMBINACIONES DE CARGAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.

Para definir las clases de carga que se podrán utilizar en este proyecto, se debe definir primero la norma bajo la cual resulta más conveniente y realista el desarrollo del proceso de diseño. Conviene comparar primero las combinaciones de carga ofrecidas por cada norma y luego seleccionar la más conveniente para con ello empezar a calcular las cargas de diseño del puente.

➤ **Combinaciones de carga ofrecidas por el CCP-14.**

Las combinaciones de carga del Código Colombiano de Puentes edición 2014 ofrecen una importante gama de combinaciones de carga utilizadas con el fin de lograr un diseño seguro y óptimo de este tipo de estructuras. No obstante, es necesario analizar el tipo de cargas que pueden aplicar de este código al tipo de puente diseñado aquí. A continuación en la **Tabla 4** y **Tabla 5** se listan los tipos de carga manejados por este código y la viabilidad de su aplicación en este tipo de proyectos, dividiéndolas según el criterio establecido por este reglamento: las cargas permanentes y las transitorias.

Tabla 4: Tipos de carga manejados en el CCP-14 y aplicables al diseño estructural de puentes peatonales en guadua. Parte 1: Cargas permanentes. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

Tipo	Descripción	Aplicable
CR	Fuerzas debidas al flujo plástico	No
DD	Fuerza de fricción negativa	No
DC	Peso propio de componentes estructurales y accesorios no estructurales	Sí
DW	Peso propio de carpeta de rodamiento e instalaciones	Sí
EH	Empuje lateral de suelo	No
EL	Fuerzas misceláneas resultantes del proceso de construcción, incluyendo el izaje de voladizos en construcción por segmentos	No
ES	Sobrecarga de Suelo	No
EV	Presión vertical del peso propio del suelo de relleno	No
PS	Fuerzas secundarias debidas a pretensado	No
SH	Fuerzas debidas a retracción	No



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 5: Tipos de carga manejados en el CCP-14 y aplicables al diseño estructural de puentes peatonales en guadua. Parte 2: Cargas transitorias. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

Tipo	Descripción	Aplicable
BL	Carga de Explosión	No
BR	Fuerza de frenado vehicular	No
CE	Fuerza centrífuga vehicular	No
CT	Fuerza de colisión vehicular	No
CV	Fuerza de colisión de embarcaciones	No
EQ	Carga sísmica	Sí
FR	Carga de fricción	No
IC	Carga de Hielo	No
IM	Incremento de carga dinámica vehicular	No
LL	Carga viva vehicular	Si
LS	Sobrecarga viva vehicular	No
PL	Carga viva peatonal	Sí
SE	Fuerzas debidas a asentamiento	No
TG	Fuerzas debida a gradiente de temperatura	No
TU	Fuerza debida a temperatura uniforme	No
WA	Carga de agua y presión de la corriente	No
WL	Carga de viento sobre la carga viva	No
WS	Carga de viento sobre la estructura	Sí

Nótese que buena parte de las cargas tanto en la categoría permanente como en la parte transitoria no se utilizan en esta clase de diseños. Las razones pueden variar empezando por las cargas permanentes, considerando que en algunos casos estas cargas no son aplicables (véase el caso de cargas por retracción, flujo plástico, pretensado) y en otras no aplicarían para esta tipología de puente (fuerzas por izado y construcción, fuerzas de fricción negativa, sobrecarga de suelo y presión vertical por el suelo de relleno).

En cuanto a las cargas transitorias cabe destacar que muchas de ellas dependen de cargas vehiculares que no siempre son aplicables en este tipo de puentes (debido a que se necesita cumplir algunas condiciones que se mencionarán más adelante para definir su aplicabilidad). Y en cualquier caso, el vehículo de diseño a utilizar no presenta cargas tan altas como las propuestas en el apartado de cargas vivas de la sección 3 del CCP-14¹⁶.

¹⁶ Ministerio de Transporte, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 2013. Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia. American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes. 2009. Estados Unidos. Respecto a este punto, el código menciona el uso de cargas vivas por peatón en este tipo de puentes, lo cual de forma implícita indica que no se requieren vehículos de diseño. Sin embargo, en el manual de diseño de puentes peatonales de la AASHTO del año 2009



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Ahora bien, sumado a la baja cantidad de tipos de carga que pueden tomarse de este reglamento se añade otra variable adicional que es la correspondiente a la filosofía de diseño de la estructura, la cual se define como filosofía LRFD. Esta filosofía de diseño toma en consideración las condiciones últimas de resistencia del material utilizado. Sin embargo, el utilizado en este apartado difiere en su comportamiento al aplicado en este reglamento dado que es un material que al poseer un campo plástico virtualmente nulo se ve obligado a trabajar bajo condiciones de esfuerzos admisibles (metodología ASD), generando la duda acerca de la aplicabilidad de estos tipos de carga y sus combinaciones para estas condiciones tan especiales.

➤ JUSTIFICACIÓN DEL USO DE COMBINACIONES DE CARGA

El uso de combinaciones de carga utilizado en este proyecto se apoya en el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10), el cual justifica su uso bajo la condición de esfuerzos admisibles sobre los cuales recomienda trabajar como bien menciona en su sección G.12.6.1.1 para estructuras en guadua:

“Todos los elementos de guadua de una estructura deben ser diseñados, construidos y empalmados para resistir los esfuerzos producidos por las combinaciones de cargas de servicio consignadas en B.2.3.1 del presente reglamento y las limitaciones deflexión estipuladas en G.12.8.9.”

Frente a lo expuesto, el Reglamento expone en la sección B.2.3.1 (segundo párrafo):

“En el presente Reglamento NSR-10, todos los materiales estructurales, con la excepción de la madera y guadua en el título G, se diseñan por el método de la resistencia y por lo tanto las combinaciones básicas aplicables a los materiales estructurales prescritos en el Reglamento y no deben utilizarse. Se incluyen para aquellos casos especiales en los cuales el diseño se realiza por el método de los esfuerzos admisibles y solo deben emplearse cuando así lo indique explícitamente el Título o sección correspondiente del Reglamento.”

La segunda razón radica en que contrario a la NSR-10, el CCP-14 no contempla unas combinaciones de carga que puedan utilizarse para este tipo de material. La sección 8 del CCP-14 dedicada para estructuras en madera omite los detalles apoyado en la escasa investigación presentada sobre el tema a nivel nacional. Por lo tanto y en consideración de los tipos de carga que se pueden aplicar a este tipo de proyecto, estudio del material y la aplicabilidad de Reglamento se opta finalmente por la NSR-10 para el desarrollo de este proyecto.

se propone el uso de un vehículo de diseño por mantenimiento o emergencia, pero su uso dependerá de las condiciones de accesibilidad junto con el ancho de tablero que posea el puente, adicional a que esta misma norma lo define como un vehículo pequeño en relación al utilizado de manera estándar por el manual de diseño sísmico de puentes de la AASHTO. Más adelante se indicará el modo de cálculo y clase de vehículo utilizado.



➤ **Combinaciones de carga ofrecidas por el NSR-10.**

Para el caso de las combinaciones de carga contempladas para este reglamento se contemplan dos tipos de combinaciones. La primera está contemplada para las condiciones de resistencia última (sección B.2.4) que, al igual que las combinaciones contempladas para el CCP-14 se emplean para el caso de materiales con capacidad de desarrollo de un amplio campo plástico (como el acero y el concreto reforzado), mientras que por otro lado está el grupo de combinaciones de carga por condiciones de servicio indicadas en la sección B.2.3 que pueden adecuarse un poco mejor al material trabajado en este proyecto. Las combinaciones de carga que se muestran en este apartado son las indicadas en la sección B.2.3.1 de la NSR-10 son las siguientes:

$$D + F$$

$$D + H + F + L + T$$

$$D + H + F + (L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$D + H + F + 0.75(L + T) + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$D + H + F + W$$

$$D + H + F + 0.7E$$

$$D + H + F + 0.75W + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$D + H + F + 0.75(0.7E) + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$0.6D + W + H$$

$$0.6D + 0.7E + H$$

Siendo:

D= Carga muerta consistente en:

- (a) Peso propio del elemento.
- (b) Peso de todos los materiales de construcción incorporados a la edificación y que son permanentemente soportados por el elemento, incluyendo muros y particiones divisorias de espacios.
- (c) Peso del equipo permanente.

E = fuerzas sísmicas reducidas de diseño ($E = F_s/R$) que se emplean para diseñar los miembros estructurales.

L= Carga Viva.

F= Cargas debida al peso y presión de fluidos con densidades bien definidas y alturas máximas controlables.

T= Fuerzas y efectos causados por efectos acumulados de variación de temperatura, retracción de fraguado, flujo plástico, cambios de humedad, asentamiento diferencial o combinación de varios de estos efectos.

G= Carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento.

L= Cargas vivas debido al uso y ocupación de la edificación, incluyendo cargas debidas a objetos móviles, particiones que se pueden cambiar de sitio. **L** incluye cualquier reducción que se permita. Si se toma en cuenta la resistencia a cargas de impacto este efecto debe tenerse en cuenta en la carga viva **L**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

L_e = Carga de empozamiento de agua.

L_r = Carga viva de cubierta.

L_0 = carga viva sin reducir, en kN/m². Véase B.4.5.1.

H = Cargas debidas al empuje lateral de suelo, de agua freática o materiales almacenados con restricción horizontal.

W = Carga de viento.

Haciendo un análisis detallado de este sistema de combinación de cargas, se observa que buena parte de ellas sí pueden emplearse en esta clase de proyectos (Con excepción de L_0 en el ámbito de cargas por flujo plástico). Queda por supuesto la incógnita acerca de la metodología de cálculo de las cargas dado que es una estructura que se saldría de los alcances de la norma como bien explica la sección G.12.1.3: “...Esta norma no se podrá utilizar para el diseño de ningún tipo de puente o estructuras diferentes de edificaciones, limitándose a aquellas cuyo uso sea vivienda, comercio, industria y educación.”. Ante esta condición, el decreto 945 de 2017 a través de la modificación del artículo A.1.2.4.2 que indica lo siguiente:

“Ante los avances de la ciencia y tecnología en el análisis y diseño sismo resistente de estructuras, algunas restricciones provenientes de la primera normativa sismo resistente expedida en 1984 que se mantienen en la Ley 400 de 1997 han sido superadas. Por tal razón, **se permite el uso de los requisitos de sismo resistencia y de diseño de los materiales estructurales cubiertos en el presente Reglamento NSR-10 en el diseño de estructuras que no puedan ser consideradas edificaciones ni estructuras convencionales, pero que hagan parte de construcciones que sean necesarias para el cumplimiento del deber constitucional de preservar la vida y la salubridad de los colombianos ante la ocurrencia de un sismo u otro desastre natural y que requiere de la correcta operación de estas construcciones para preservarlas.** La utilización de estos requisitos técnicos y científicos de sismo resistencia y de diseño y construcción de los materiales cubiertos por el presente Reglamento NSR-10, es aplicable en los casos y tipologías de construcción de estructuras no convencionales, las cuales están explícitamente definidas en el apéndice A-1 del presente Reglamento NSR-10.”.

Como puede observarse, esta modificación al artículo otorga un mayor grado de libertad al diseñador de seleccionar las propiedades mecánicas, ecuaciones de diseño y también criterios descritos en este reglamento para el análisis estructural y posterior diseño de los elementos.

- **Propuesta para el cálculo de cargas aplicadas a puentes peatonales en guadua usando como base la NSR-10 y la CCP-14.**

Para esta propuesta se procede a explicar el método de cálculo que se usará para cada tipo de carga que se contempla en esta propuesta.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Carga Muerta (D). Se determina de manera tradicional, calculando el peso aplicado sobre el tablero del puente por unidad de área. También puede multiplicarse este valor de carga por área por el ancho aferente de los elementos principales del puente para obtener un valor por carga lineal

Carga Viva (Lp). Para la carga viva se puede tomar el valor propuesto por la sección 3.6.1.6 del CCP-14, el cual será de 3.6 kN/m². No obstante, el manual de diseño de puentes peatonales de la AASHTO del año 2009 (LRFD Guide Specifications for the Design Bridges) propone también algunos tipos de carga viva, a saber:

Carga Viva Ecuestre (L_{EQ}): Carga viva por tránsito de animales de carga o transporte de pasajeros. Esta carga según la norma estudiada¹⁷ tendrá un valor de 1.00kips sobre un área de 16 pulg² (equivalente a una carga dinámica de 4.48kN). Esta carga debe considerarse cuando exista viabilidad de acceso de esta clase de cargas al puente.

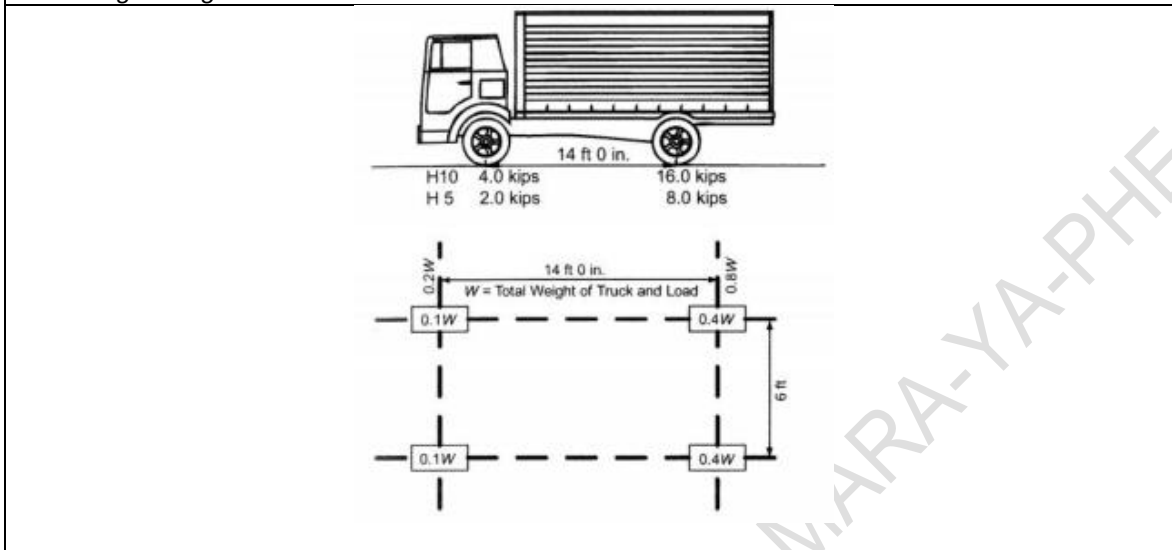
Carga Viva Por vehículo de diseño (L_C): La guía para diseño de puentes peatonales de la AASHTO contempla también el paso eventual de un vehículo de mantenimiento. A continuación se muestran las dimensiones que tiene el vehículo, junto con la **Tabla 6**, la cual muestra el valor de carga que debe ofrecer el vehículo en función del ancho de tablero. Cabe destacar que al igual que en el caso de las cargas vivas ecuestres, este tipo de carga debe analizarse solamente cuando exista la viabilidad de acceso del vehículo de diseño, como se observa en la **Figura 11**.

¹⁷ American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. 2009. Equestrian Loads. En: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges. P.5.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 11: Vehículo de diseño para puentes peatonales Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.



Nota: Las cargas y longitudes indicadas en la figura se encuentran en unidades del sistema americano de unidades y para incluirlos en el diseño se deberán convertir a las unidades del sistema internacional o las que defina el usuario en el diseño.

Tabla 6: Tipo de vehículo utilizado para el diseño de puentes peatonales. Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.

Ancho libre de tablero	Vehículo de Diseño
2.10m a 3.0m	H5
Mayor a 3.0m	H10

Carga Viva por motos y bicicletas (L_b): para el caso de motos y bicicletas se toma como referencia lo citado por el manual abreviado para diseño de puentes para peatones y bicicletas holandes¹⁸, el cual describe que para el caso de bicicletas se puede emplear bien sea el caso de una carga de superficie 5kN/m² o una carga puntual dinámica de 7kN aplicada sobre una superficie de 10x10cm¹⁹. Si el puente presenta luces con longitudes mayores a 10m, se puede calcular la carga mediante la siguiente ecuación:

¹⁸ Ipv delft. vertical loads. en: brief dutch design manual for bicycle and pedestrian bridges. ver. 1.3. 2015. p. 38.

¹⁹ Se acude a esta norma dado que en los tres manuales principales estudiados en este proyecto (NSR-10, CCP-14 y el manual de diseño de puentes peatonales de la AASHTO) no se encontró información correspondiente a la aplicación de este tipo de cargas para incluirlas en el diseño de puentes. Por tanto, este



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

$$L_b = 2.0 + \frac{120}{L_{puente} + 30} \text{ en } \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

Siendo L_b la carga viva por bicicleta y L_{puente} la longitud total del puente. En ningún caso la carga calculada deberá ser inferior a los 2.5kN/m². Cabe destacar que al igual que en los otros tipos de carga viva estudiados en este documento, su aplicación está condicionada a la accesibilidad de las bicicletas o motos al puente.

Es de anotar también que por motivos de durabilidad y también para garantizar un diseño conservador debido a que el material utilizado en este proyecto es de estudio reciente, que no se permitirá el cálculo de carga viva reducida (L como resultado de una variación de la variable L_0 indicado en la sección B.4.5 de la NSR-10).

Carga por Viento (W). La presión de viento de diseño a barlovento y sotavento será la mayor entre la calculada por el método analítico determinado en la sección B.6 de la NSR-10²⁰ y la presión propuesta en la tabla 3.8.1.2.1-1 de la CCP-14²¹. Para las cargas de viento actuantes sobre tablero, se tomará un valor de presión invertida de 0.96kPa²². Mientras tanto, en el caso de puentes que hagan uso de cubiertas, el valor de presión será el mayor entre el obtenido mediante el método analítico descrito en la sección B.6 de la NSR-10 y el indicado en la tabla 3.8.1.2.1-1 en el apartado de superficies planas grandes.

Carga por Sismo (E). Para la carga de sismo se hace un planteamiento parecido al presentado para la carga de viento. Esto es, hacer un comparativo entre el espectro de diseño tanto por la NSR-10 como por la CCP-14 tomando el mayor de los dos valores como el espectro de diseño que se ingresará al modelo.

Carga por Granizo (G). La carga por granizo se calculará bajo las condiciones propuestas en la NSR-10 en su sección B.4.8.3, y cuyo valor será de 1.0kN/m² y de 0.5kN/m² cuando

documento suple bien la información requerida para este tipo de cargas y su uso en el diseño de puentes peatonales.

²⁰ Dadas las características especiales de este tipo de estructura, se opta por hacer uso del método analítico con el fin de incluir una mayor precisión en el cálculo de las fuerzas de viento.

²¹ Al respecto de éste método de cálculo, se indica en la parte inferior de ésta tabla que los valores de carga lineal aplicada sobre los elementos no deberán ser menores a 4.5kN/m a barlovento y de 2.2kN/m a sotavento. Frente a este punto es importante indicar que dependiendo de la longitud y peso total del puente pueden ser valores muy altos de carga lateral comparados con otros tipos de carga (incluyendo la sísmica) y que por tanto la carga que gobierna la totalidad del diseño puede ser la aplicada con estos valores. Se recomienda entonces hacer una valoración preliminar aplicando estas cargas y si la carga de diseño gobernante corresponde a viento con un valor muy superior a los propuestos por los demás tipos de carga, entonces cambiarlos por las cargas resultantes de la multiplicación de las presiones de la tabla por el ancho del elemento analizado.

²² Este valor corresponde al descrito en la sección 3.8.2 del CCP-14. Al compararlo con la presión de viento vertical establecido en el manual de diseño de puentes peatonales es aproximadamente el mismo valor (0.020ksf equivalente a 0.957KPa).



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

las cubiertas presentan una inclinación superior a los 15°. En caso de que el puente no lleve cubierta, la carga por granizo se aplicará sobre el tablero.

Carga por Empozamiento (Le). Las cargas por empozamiento se evaluarán bajo las condiciones que se propongan en la sección B.4.8.2 de la NSR-10, aunque se recomienda que en el caso de puentes con cubierta que la misma no presente tubería de desagüe para evitar este efecto y que la disipación de las aguas lluvias se presente por gravedad dejando totalmente despejada la superficie.

En el caso de que el puente no lleve cubierta se deberá determinar el volumen aproximado de empozamiento para así determinar la carga aplicada sobre el tablero.

Carga Viva de Cubierta (Lr). Este tipo de carga aplicará exclusivamente en puentes que lleven cubierta y cuya accesibilidad se vea restringida para mantenimiento. El valor de esta carga viva será como bien indica la tabla B.4.2.1-2, el cual será de 0.5kN/m² para cubiertas con inclinaciones entre los 0° y los 15° y de 0.35kN/m² para cubiertas con pendientes mayores a los 15°. Se recomienda que la cubierta sea inclinada para evitar empozamiento o acceso a peatones, pero en caso de que la disposición arquitectónica o las condiciones de uso lo obliguen, la cubierta totalmente plana tendrá un valor de carga viva de cubierta de 5.00kN/m².

Carga por Fluidos, Empujes de Tierra y Variación Térmica (F, H y T). Estas cargas cuyo uso aplica principalmente para otro tipo de estructuras (como es el caso de tanques y muros de contención) no se aplican aquí salvo que por disposición geométrica, condiciones geotécnicas o hidráulicas así lo obliguen. En cualquier caso, estas cargas deberán evaluarse y multiplicarse por el factor de seguridad que se indique en la sección B.2.4 de la NSR-10 para cada tipo de carga.

➤ Propuesta de Combinaciones de carga para el análisis y diseño de puentes peatonales en guadua.

En consideración con las combinaciones de carga propuestas tanto en la NSR-10 como en la CCP-14, se puede finalmente optar por presentar una variación de las combinaciones de carga para condiciones de servicio de la NSR-10 tomando en cuenta las condiciones del material utilizado para el proyecto, las cuales se proponen de esta manera:

$$\begin{aligned} D \\ D + L \\ D + (L_r \text{ o } G \text{ o } L_e) \\ D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e) \\ D + W \\ D + 0.7E \\ D + 0.75W + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e) \\ D + 0.75(0.7E) + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e) \\ 0.6D + W \\ 0.6D + 0.7E \end{aligned}$$



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Se propone la omisión de las cargas de tipo T, H y F debido a que éstas pueden aplicarse en otros puntos de la estructura, tales como pilas y estribos, los cuales al ir en otros materiales se pueden ceñir a las combinaciones de carga que proponga el CCP-14 o en su defecto las combinaciones de carga por resistencia propuestas en la sección B.2.4 de la NSR-10. Las cargas en cada combinación se calcularán bajo los criterios indicados en el numeral 6.1.5.4.3.

Consideraciones para el ingreso de la carga viva. Como bien se describió en el numeral 6.1.5.4.3.2, las diversas normas clasifican las cargas vivas en diferentes categorías y usos. Se debe evaluar entonces bajo qué condiciones se pueden aplicar estas cargas y con ello hacer una propuesta que se acerque el máximo posible a las condiciones reales que pueda presentar el puente durante la prestación del servicio.

Bajo esta premisa, este trabajo propone 4 condiciones de carga viva combinada y 3 independientes que deben aplicarse a los puentes peatonales. Se parte de la premisa de que algunas combinaciones incluyen el uso simultáneo de dos tipos de carga viva, los cuales se aplicarán sobre cada calzada del puente. Así entonces se muestra la **Tabla 7** la cual explica un poco mejor esta consideración de aplicación de carga viva.

Tabla 7: Condiciones de aplicación de cargas vivas sobre el puente. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

Vista del tablero en planta:		
Eje Long. Del Puente	← Calzada 1: 50% del ancho total de tablero Sentido del recorrido del peatón, bicicleta o ecuestre Calzada 2: 50% del ancho total de tablero Sentido del recorrido del peatón, bicicleta o ecuestre →	
Condición de Carga	Calzada 1	Calzada 2
C_{L1}	L_P	L_b
C_{L2}	L_P	L_{EQ}
C_{L3}	L_b	L_{EQ}
C_{L4}^*	L_C	
L_1	L_P	
L_2	L_{EQ}	
L_3	L_b	

*En el caso de la cuarta condición de carga viva solamente se considera el vehículo de diseño debido a que el ancho de vehículo es tal que no permite el paso de peatones, ecuestres u otros elementos como motos y bicicletas.



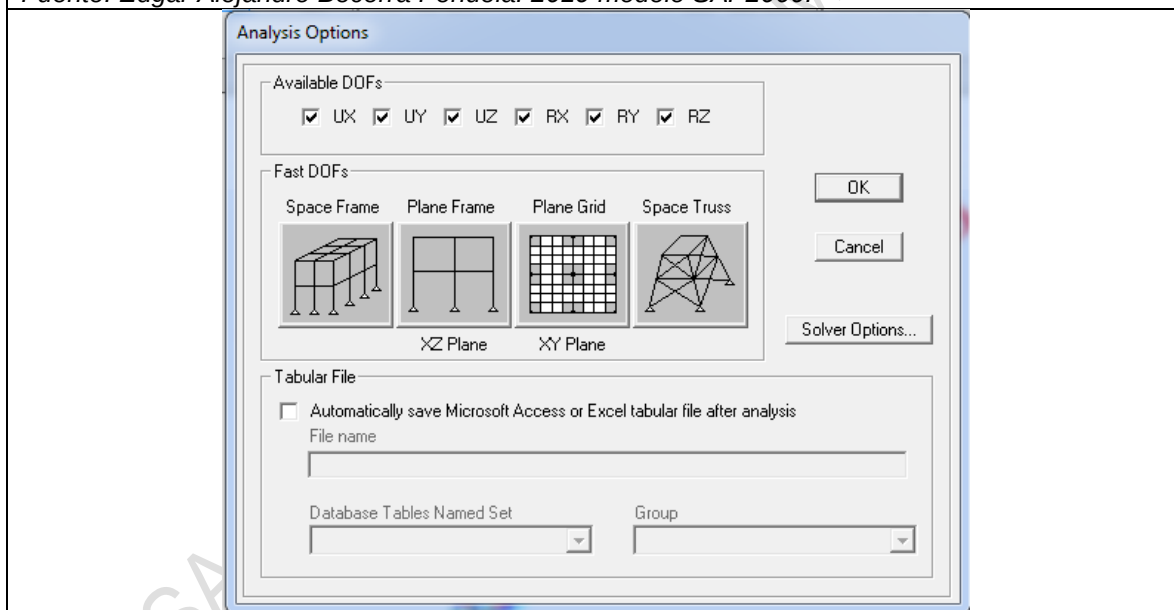
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Lo anteriormente presentado indica entonces que toda combinación de carga que incluya carga viva deberá entonces derivarse en una combinación de carga adicional que incluya cada condición de carga viva propuesta en la tabla anterior. Se indica también que las condiciones de carga ecuestre, bicicleta o vehicular pueden aplicarse siempre y cuando las condiciones de accesibilidad (y de ancho libre de tablero para el caso del vehículo de diseño) lo permitan.

5.2.5 PROCESO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Una vez definidos la geometría del proyecto, materiales, secciones y cargas utilizadas se puede proceder con el proceso de análisis estructural. Se debe asegurar que el modelo en el software de elementos finitos permitirá el análisis del modelo en tres dimensiones seleccionando todos los grados de libertad que presenta el modelo como muestra la **Figura 12**.

Figura 12: Verificación del proceso de análisis del modelo en 3 dimensiones. Elaboración propia. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.



5.2.6 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA TABLA A.1.3.1 NSR-10

En este capítulo se realizó el estudio comparativo de la tabla A.1.3.1 del título A de la NSR-10. Procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas. Se verifico los pasos que requiere una edificación nueva contra los pasos que se desarrollaron para la metodología del diseño estructural de puentes peatonales en guadua. Como se observa en la tabla **Tabla 8**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 8: Procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y puentes Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela.

Tabla A.1.3-1	
Procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y puentes	
DISEÑO EDIFICACIONES NUEVAS	PUENTES
Paso 1 – Pre dimensionamiento y coordinación con los otros profesionales	
Definición del sistema estructural, dimensiones tentativas para evaluar preliminarmente las diferentes solicitaciones tales como: la masa de la estructura, las cargas muertas, cargas vivas, los efectos sísmicos, y las fuerzas de viento. Estas dimensiones preliminares se coordinan con los otros profesionales que participan en el diseño.	SI APLICA , se debe aplicar las definiciones del sistema estructural, así como las dimensiones tentativas para evaluar preliminarmente las diferentes solicitaciones del caso. Este paso 1 se debe hacer igual como para el diseño de las edificaciones nuevas. Numeral 5.1 Preliminares de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua.
Paso 2 - Evaluación de las solicitaciones definitivas	
Con las dimensiones de los elementos de la estructura definidas como resultado del paso 1, se evalúan todas las solicitaciones que pueden afectar la edificación de acuerdo con los requisitos del Título B del Reglamento. Estas incluyen: el efecto gravitacional de la masa de los elementos estructurales, o peso propio, las cargas de acabados y elementos no estructurales, las cargas muertas, las fuerzas de viento, las deformaciones impuestas por efectos reológicos de los materiales estructurales y asentamientos del suelo que da apoyo a la fundación. así mismo se debe determinar la masa de la edificación y su contenido cuando así lo exige el Reglamento, la cual será empleada en la determinación de los efectos sísmicos, de acuerdo con los pasos siguientes.	SI APLICA , con las dimensiones de los elementos de la estructura definida en pre dimensionamiento se procede a evaluar todas las solicitaciones de carga requeridas en el análisis estructural hecho en numeral 5.2.4 Definición de las combinaciones de cargas utilizadas en el proyecto. Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua.
Paso 3 - Obtención del nivel de amenaza sísmica y los valores de Aa y Av	
Este paso consiste en localizar el lugar donde se construirá la edificación dentro de los mapas de zonificación sísmica dados en el capítulo A.2 del Reglamento y en determinar el nivel de amenaza sísmica del lugar, de acuerdo con los valores de los parámetros Aa y Av obtenidos en los mapas de zonificación sísmica del Capítulo A.2. El nivel de amenaza sísmica se clasificará como alta, intermedia, o baja. En el Apéndice A-4 se presenta una enumeración de los municipios colombianos, con su definición de la zona de amenaza sísmica, y los valores de los parámetros Aa y Av, entre otros.	SI APLICA , Este paso de nivel de amenaza sísmica igualmente se realiza pero con los expresado en el código de puentes CCP-14, (esto se puede ver en el caso de estudio No. 1 del Numeral 8.1.3, en especial el 8.1.3.3 sismo de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua).
Paso 4 - Movimientos sísmicos del diseño	
Deben definirse unos movimiento sísmicos de diseño en el lugar de la edificación, de acuerdo con los requisitos del capítulo A.2 del Reglamento y, en el caso de edificaciones cubiertas por A.1.2.3.3, con los requisitos del Capítulo A.12 del Reglamento, tomando en cuenta:	SI APLICA , Este paso de nivel de amenaza sísmica igualmente se realiza, pero con los expresado en el código de puentes CCP-14. En relación con el diseño del espectro se utiliza el del CCP-14. (esto se puede ver en el caso de estudio No. 1 del numeral 8.1.3, en especial el 8.1.3.3 sismo de la de la Metodología para



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

a) La amenaza sísmica para el lugar determinada en el paso 3, expresa a través de los parámetros A_a y A_v, o A_d según sea el caso, los cuales representan la aceleración horizontal pico efectiva expresada en términos de aceleración el sismo de diseño, b) Las características de la estratificación del suelo subyacente en el lugar a través de unos coeficientes de sitio F_a, F_v, y c) La importancia de la edificación para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo a través de un coeficiente de importancia I.	el diseño estructural de puentes peatonales en guadua).
Las características de los movimientos sísmicos de diseño se expresan por medio de un espectro elástico de diseño. El reglamento contempla descripciones alternativas del sismo de diseño, ya sea a través de familias de acelerogramas, o bien por medio de expresiones derivadas de estudios de microzonificación sísmica, las cuales deben determinarse siguiendo los requisitos en el capítulo A.2.	
Paso 5 - Características de la estructuración y del material estructural empleado	
El sistema estructural de resistencia sísmica de la edificación debe clasificarse dentro de uno de los sistemas estructurales prescritos en el capítulo A.3: sistema de muros de carga, sistema combinado, sistema de pórtico, o sistema dual. El reglamento define limitaciones en el empleo de los sistemas estructurales de resistencia sísmica en función de la zona de amenaza sísmica donde se encuentre localizada la edificación, del tipo de material estructural empleado (concreto estructural, estructura metálica, mampostería estructural, o madera), de la forma misma como se disponga el material en los elementos estructurales según este en posibilidad de responder adecuadamente ante movimientos sísmicos como los esperados por medio de su capacidad de disipación de energía, la cual puede ser especial (DES, moderada (DMO) o mínima (DMI); de la altura de la edificación, y de su grado de irregularidad.	SI APLICA, Teniendo en cuenta que este Reglamento es para edificaciones, por ser un puente no maneja alturas y grado de irregularidad. Dado lo anterior, se realiza este paso con las características la estructuración teniendo en cuenta las amenazas sísmicas donde se encuentran localizada la estructura, el tipo de material empleado para responder adecuadamente ante movimientos sísmicos por medio de su capacidad de disipación de energía. Se genera en el pre dimensionamiento de una geometría para determinar el sistema estructural del puente, generando una estructura como una viga que trabaja simplemente apoyada, en los estribos o apoyos del puente. (esto se puede ver en los preliminares del numeral 5.1, en especial el 5.1.5 y 5.1.6. de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua).
Paso 6 - Grado de irregularidad de la estructura y procedimiento de análisis	
Definición del procedimiento de análisis sísmico de la estructura de acuerdo con la regularidad o irregularidad de la configuración de la edificación, tanto en planta como en alzado, su grado de redundancia o de ausencia de ella en el sistema estructural de resistencia, su altura, las características del suelo en el lugar y el nivel de amenaza sísmica, siguiendo los preceptos dados en el capítulo A.3 de este Reglamento.	NO APLICA PARA PUENTES
Paso 7 - Determinación de las fuerzas sísmicas	



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Obtención de las fuerzas sísmicas, F_s, que deben aplicarse a la estructura para lo cual deben usarse los movimientos sísmicos de diseño definidos en el paso 4.	SI APLICA, con la utilización de los datos del paso 4 y 5 se aplican en el software de elementos finitos SAP2000. (esto se puede ver en el caso de estudio No. 1 del numeral 8.1, en especial el 8.1.3. cargas de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua.).
Paso 8 - Análisis sísmico de la estructura	
El análisis sísmico de la estructura se lleva a cabo aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura, tal como se define en el capítulo A.3. Este análisis se realiza para los movimientos sísmicos de diseño sin ser divididos por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, y debe hacerse por el método que se haya definido en el paso 6. Deben determinarse los desplazamientos máximos que imponen los movimientos sísmicos de diseño a la estructura y las fuerzas internas que se derivan de ellos.	SI APLICA, en revisión de Reglamento de título A. Este análisis sísmico se realiza para los análisis sísmicos de diseño sin ser divididos por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, pero sin la aplicación del paso 6 que es solo para edificaciones. Estos datos se ingresan en el software de elementos finitos SAP2000. (esto se puede ver en el caso de estudio No. 1 del numeral 8.1, en especial el 8.1.3. cargas de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua).
Paso 9 - Desplazamientos horizontales	
Evaluación de los desplazamientos horizontales, incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura, y las derivas (desplazamiento relativo entre niveles contiguos), utilizando los procedimientos dados en el capítulo A.6 y con base en los desplazamientos obtenidos en el paso 8.	NO APLICA PARA PUENTES
Paso 10 - Verificación de derivas	
Comprobación de que las derivas de diseño obtenidas no excedan los límites dados en el capítulo A.6. Si la estructura excede los límites de la deriva, calculada incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura, es obligatorio rigidizarla, llevando a cabo nuevamente los pasos 8, 9, y 10 hasta cuando cumpla la comprobación de derivas.	NO APLICA PARA PUENTES
Paso 11 - Combinación de las diferentes solicitaciones	
Las diferentes solicitaciones que deben ser tenidas en cuenta, se deben combinar para obtener las fuerzas internas de diseño de la estructura, de acuerdo con los requisitos del capítulo B.2 del Reglamento, por el método de diseño propio de cada material estructural. En cada una de las combinaciones de carga requeridas, las solicitaciones se multiplican por el coeficiente de carga prescrito para esa combinación en el capítulo B.2 del Reglamento. En los efectos causados por el sismo de diseño se tiene en cuenta la capacidad de disipación de energía del sistema estructural, lo cual se logra empleando unos efectos sísmicos reducidos de diseño, F_s, determinadas en el paso 7, por el coeficiente de capacidad de disipación de energía	SI APLICA, de acuerdo a lo realizado en el Paso 2 - Evaluación de las solicitaciones definitivas, Paso 7 - Determinación de las fuerzas sísmicas y el Paso 8 - Análisis sísmico de la estructura. Además el coeficiente de disipación de energía R, es función de : a) El sistema de resistencia sísmica de acuerdo con la clasificación dada en el capítulo A.3, Si aplica b) Del grado de irregularidad de la edificación, No aplica c) Del grado de redundancia o de ausencia de ella en el sistema estructural de resistencia sísmica, y, No aplica d) De los requisitos de diseño y detallado de cada material, para el grado de capacidad de disipación de



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

R ($E = F_s / R$). EL coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, es función de:	energía correspondiente (DMI, DMO, O DES), tal como se especifica en el capítulo A.3. Si aplica.
a) El sistema de resistencia sísmica de acuerdo con la clasificación dada en el capítulo A.3, b) Del grado de irregularidad de la edificación, c) Del grado de redundancia o de ausencia de ella en el sistema estructural de resistencia sísmica, y d) De los requisitos de diseño y detallado de cada material, para el grado de capacidad de disipación de energía correspondiente (DMI, DMO, O DES), tal como se especifica en el capítulo A.3.	
Paso 12 - Diseño de los elementos estructurales	
Se lleva a cabo de acuerdo con los requisitos propios del sistema de resistencia sísmica y del material estructural utilizado. Los elementos estructurales deben diseñarse y detallarse de acuerdo con los requisitos propios del grado de capacidad de disipación de energía mínimo (DMI), moderado (DMO), o especial (DES) prescrito en el capítulo A.3, según les corresponda, lo cual le permitirá a la estructura responder, ante la ocurrencia de un sismo, en el rango inelástico de respuesta y cumplir con los objetivos de las normas sismo resistentes. El diseño de los elementos estructurales debe realizarse para los valores más desfavorables obtenidos de las combinaciones obtenidas en el paso 11, tal como prescribe el Título B de este Reglamento	Si aplica , con la tabla de datos de salida se calculan los elementos del puente en guadua según el título G.12 y el Numeral 8.2. Diseño de elementos de la Metodología para el diseño estructural de puentes peatonales en guadua.

5.2.7 DETERMINACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE PUENTE - SETRA

En relación a la consulta del documento SETRA²³, se puede determinar a qué clase corresponde el puente, haciendo claridad este puente puede ser ocasionalmente cargado en toda su área con peatones.

A continuación, se presentan imágenes de rangos de aceleraciones verticales y horizontales. Como se observa en la **Tabla 9** y **Tabla 10**.

²³ Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 9: Rangos de aceleración (in . m/s²) para vibraciones verticales, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Tabla 10: Rangos de aceleración (in . m/s²) para vibraciones horizontales, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.

Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2		Mean			
Range 3			Min		
Range 4					

- Clasificación del rango de frecuencias**

Range 1: máximo riesgo de resonancia.

Range 2: mediano riesgo de resonancia.

Range 3: Bajo riesgo de resonancia para situaciones de cargas.

Range 4: Depreciable el riesgo de resonancia.

A continuación, se presentan imágenes de rangos de frecuencia de vibración horizontal y vertical. Como se observa en la **Tabla 11** y **Tabla 12**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 11: Rango de frecuencia (Hz) de vibración vertical y longitudinal, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.

Frequency	0	1	1.7	2.1	2.6	5
Range 1						
Range 2						
Range 3						
Range 4						

Tabla 12: Rango de frecuencia (Hz) de vibración transversal horizontal, Fuente: Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.

Frequency	0	0.3	0.5	1.1	1.3	2.5
Range 1						
Range 2						
Range 3						
Range 4						



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

5.3 DISEÑO DE ELEMENTOS

El diseño estructural de los elementos que conforman el puente toma como fundamento los resultados de las investigaciones realizadas para la construcción de la sección G.12 del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes del año 2010. A continuación se muestra el método de diseño de la piezas según a la condición que se vea sometido el material (tensión, compresión o flexión o cortante), acompañado de la sección de la norma que establece sus parámetros.

5.3.1 COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA GUADUA.

Según la sección G.12 se pueden presentar modificaciones dependiendo de las condiciones presentes que puede llegar a alterar sus niveles de resistencia. Esto implica que al momento de realizar el diseño, inicialmente se debe modificar la capacidad del material bajo la carga que se quiera evaluar (ya sea cortante, flexión, o carga axial) para así considerar la resistencia más cercana a las condiciones que pueden presentar en campo. Las que presenta la sección G.12 son las siguientes:

5.3.1.1 Coeficiente por duración de carga (CD). Apoyado en la tabla G.12.7-4 del Reglamento. Como se observa en la **Tabla 13**.

Tabla 13: Coeficientes de modificación por duración de carga. Fuente NSR-10.

Duración de carga	Flexión	Tracción	Compresión	Compresión $\perp$	Corte	Carga de diseño
Permanente	0.90	0.90	0.9	0.9	0.90	Muerta
Diez años	1.00	1.00	1.0	0.9	1.00	Viva
Dos meses	1.15	1.15	1.15	0.9	1.15	Construcción
7 días	1.25	1.25	1.25	0.9	1.25	
Diez minutos	1.60	1.60	1.6	0.9	1.60	Viento y Sismo
Impacto	2.00	2.00	2.0	0.9	2.00	Impacto

5.3.1.2 Coeficiente por contenido de humedad (Cm). Apoyado en la tabla G.12.75 de la NSR-10. Como se observa en la **Tabla 14**.

Tabla 14: Coeficientes de modificación por contenido de humedad. Fuente NSR-10.

Esfuerzos		CH $\leq$ 12%	CH = 13%	CH = 14%	CH = 15%	CH = 16%	CH = 17%	CH = 18%	CH $\geq$ 19%
Flexión	F_b	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Tracción	F_t	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Compresión paralela	F_c	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Compresión perpendicular	F_p	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Corte	F_y	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Módulo de elasticidad	$E_{0.5}$	1.0	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90
	$E_{0.05}$								
	E_{min}								



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

5.3.1.3 Coeficiente por temperatura (Ct). Toma como base la tabla G.12.7-6 de tal manera que dependiendo de la temperatura presentada en el sitio en donde se encuentre el proyecto pueda ser susceptible de ver modificadas sus propiedades mecánicas. Como se observa en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Coeficientes de modificación por temperatura (Ct). Fuente NSR-10.

Esfuerzos		Condiciones de servicio	(C _t)		
			T ≤ 37°C	37°C ≤ T ≤ 52°C	52°C ≤ T ≤ 65°C
Flexión	F _b	Húmedo	1.0	0.60	0.40
		Seco		0.85	0.60
Tracción	F _t	Húmedo		0.85	0.80
		Seco		0.90	
Compresión paralela	F _c	Húmedo		0.65	0.40
		Seco		0.80	0.60
Compresión perpendicular	F _p	Húmedo		0.80	0.50
		Seco		0.90	0.70
Corte	F _y	Húmedo		0.65	0.40
		Seco		0.80	0.60
Modulo de elasticidad	E	Húmedo		0.80	0.80
		Seco		0.90	

5.3.1.4 Otros coeficientes de modificación. La NSR-10 toma en consideración especial los coeficientes presentados en los numerales anteriores tomando en cuenta que la guadua trabajada como material puede presentar diferencias frente a los demás materiales presentados como materiales de diseño según el título G en estos tres aspectos (contenido de humedad, duración de carga y temperatura). Sin embargo, comparte otros coeficientes con los contemplados en la sección G.2 del reglamento. Aunque de manera preferible se toman los coeficientes anteriormente citados.

➤ DISEÑO DE ELEMENTOS DE FLEXIÓN.

El diseño de elementos de guadua se podrá realizar de acuerdo a los procedimientos básicos usados en el diseño de vigas de otros materiales estructurales. La resistencia de la sección analizada por flexión en unidades de esfuerzo (MPa para el caso concerniente a este proyecto), viene dado por la ecuación G.12.8-4 de la NSR-10:

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F_b'$$

f_b = Esfuerzo a la flexión actuante, en MPa.

M = Momento actuante, en N.mm.

F_b' = Esfuerzo admisible modificado, en MPa.

S = Modulo elástico de la sección en mm³.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

El módulo elástico de la sección para una unidad individual de culmo se calcula de acuerdo a la ecuación G.12.8-5 de la NSR-10. También la el Reglamento propone la tabla G.12.8-6 para determinar el módulo de la sección para vigas compuestas (en este caso dos y tres culmos en vertical. Para otras secciones en las que se garantice el uso conjunto de los elementos que las conforman, el Reglamento propone hacer uso del teorema de Steiner representado en la ecuación G.12.8-8, y el cual se utilizó de base para los elementos registrados en la tabla anteriormente mencionada.

$$I = \sum (A_i d_i^2) + \sum I_i$$

En donde:

I = Inercia de la sección compuesta, en mm⁴.

A_i = área para el i-ésimo culmo, en mm².

d_i = distancia entre el centroide del conjunto de culmos y el centroide del i-ésimo culmo, en mm.

I_i = la inercia individual de cada culmo referida a su propio centroide, en mm⁴.

➤ DISEÑO DE ELEMENTOS A CORTANTE

Para el diseño de elementos a cortante, se debe evaluar la fuerza cortante que se presenta a una distancia del apoyo igual a la altura del elemento (h). para vigas de una sola guadua dicha altura será igual al diámetro exterior de la misma, exceptuando en voladizos donde el esfuerzo máximo de corte será calculado en la cara del apoyo. Para vigas conformadas por 2 la altura (h) corresponde a la altura real del elemento.

Ahora bien, el esfuerzo cortante paralelo a la fibra actuante sobre cualquier sección de guadua rolliza, no debe exceder el valor del esfuerzo cortante paralelo a la fibra admisible, modificado por los coeficientes correspondientes, de acuerdo a la fórmula G.12.8.-9.

$$f_v = \frac{2V}{3A} \left(\frac{3D_e^2 - 4D_e t + 4t^2}{D_e^2 - 2D_e t + 2t^2} \right) \leq F_v'$$

Dónde:

f_v = esfuerzo cortante paralelo a la fibra actuante, en MPa.

A = área de la sección transversal de los elementos de guadua rolliza, en mm².

D_e = diámetro extremo promedio de la sección de guadua rolliza, en mm.

t = espesor promedio de la sección de guadua rolliza, en mm.

F_v' = esfuerzo admisible para corte paralelo a las fibras, modificado por los coeficientes que haya lugar, en MPa.

V = fuerza cortante en la sección considerada, en N

También debe considerarse el uso de conectores transversales de acero en el caso de que lleguen a construir vigas con dos o más culmos de guadua para garantizar su estabilidad. El espaciamiento entre los conectores que se vayan a utilizar no debe ser mayor al menor de los siguientes valores:



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- a) 3 veces la altura de la viga (3h).
- b) Un cuarto de la luz libre de viga (L/4).
- c) El resultado de la ecuación G.12.8-10:

$$j = \frac{7l}{V}$$

Siendo:

j = espaciamiento entre conectores de vigas compuestas en mm.

l = luz de la viga en mm.

V = máximo cortante en la viga en kN.

➤ ELEMENTOS SOLICITADOS POR CARGA AXIAL.

Tensión axial. para cualquier sección de guadua rolliza, el valor del esfuerzo tensión axial actuante, no debe exceder el valor del esfuerzo admisible a tensión axial modificado por los coeficientes de modificación correspondientes, de acuerdo a la formula G.12.9-1

$$f_t = \frac{T}{A_n} \leq F_t'$$

Dónde:

f_t = esfuerzo a tensión actuante, en MPa

T = fuerza de tensión axial aplicada, en N.

F_t' = esfuerzo de tensión admisible, modificado por los coeficientes a que haya lugar, en MPa.

A_n = área neta del elemento, en mm².

Se debe evitar los diseños en los cuales se puedan generar esfuerzos por tensión perpendicular a la fibra del elemento en guadua debido a la baja resistencia a esta sollicitación. No obstante, si se presentan estos esfuerzos se debe garantizar la resistencia del elemento proporcionando refuerzo en la zona comprometida, a través de zunchos metálicos o platinas.

Compresión axial. Para los elementos sometidos a compresión axial se deben tener en cuenta algunos detalles preliminares, principalmente la esbeltez y la longitud efectiva.

Longitud efectiva. La longitud efectiva, según la sección G.12.9.2, corresponde a la longitud teórica de una columna equivalente con sus extremos articulados. La longitud efectiva puede calcularse con la siguiente ecuación (formula G.12.9-2 de la NSR-10):

$$l_e = l_u k$$



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Siendo:

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

k = coeficiente de longitud efectiva, según las restricciones en los apoyos tabla G.12.9-1.

l_e = longitud efectiva, en mm. Ver **Tabla 16**.

Tabla 16: G.12.9-1. Coeficiente de longitud efectiva (*). Fuente NSR-10.

Condición de los apoyos	K
Ambos extremos articulados (Ambos extremos del elementos 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

*Cuando se justifique apropiadamente, se pueden utilizar valores de K de la tabla G.4.3-1 de la NSR-10.

Esbeltez. Para las columnas constituidas por un culmo de guadua, la medida de esbeltez está dada por la expresión:

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

En donde:

λ = relación de esbeltez del elemento.

L_e = longitud efectiva del elemento, en mm.

r = radio de la sección, en mm.

El radio de giro de la sección constituido por un (1) solo culmo será calculado con la siguiente ecuación:

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

En donde:

D_e = diámetro externo promedio de la sección de guadua rolliza, en mm.

t = espesor promedio de la sección de guadua rolliza, en mm.

r = radio de giro de la sección.

Para elementos constituidos por dos o más elementos, el radio de giro r se puede calcular con la ecuación:

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

En donde:



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

I = inercia de la sección calculada de acuerdo con el numeral G.12.9.2.5, en mm^4 .

A = área de la sección transversal, en mm^2

r = Radio de giro de la sección.

Clasificación de las columnas. Las columnas pueden clasificarse por esbeltez, en cortas, intermedias o largas. Según la tabla G.12.9-2, las columnas van de la siguiente manera: Ver **Tabla 17**.

Tabla 17: Clasificación de columnas. Fuente NSR-10.

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

La esbeltez C_k es el límite entre las columnas intermedias y las columnas largas y está dada por la fórmula

$$C_k = 2.565 \sqrt{\frac{E_{0.05}}{F_c'}}$$

Dónde:

F_c' = esfuerzo admisible en compresión paralela a las fibras, modificado, en MPa

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

Bajo ninguna circunstancia es aceptable trabajar con elementos de columna que tengan esbeltez mayor de 150.

Esfuerzos máximos en columnas cortas ($\lambda < 30$). El esfuerzo máximo de compresión paralela a la fibra actuante (f_c) sobre cualquier sección de guadua rolliza en columnas cortas, no debe exceder el valor del esfuerzo de compresión paralela a las fibras admisibles (F_c') modificado por los factores correspondientes, de acuerdo a la ecuación G.12.9-7:

$$f_c = \frac{N}{A_n} \leq F_c'$$

Siendo:

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 admisible en compresión paralela a las fibras, modificado, en MPa.

Esfuerzos máximos en columnas intermedias ($30 < \lambda < C_k$). En el caso de las columnas intermedias, la capacidad resistente por compresión a las fibras paralelas viene dada por la expresión:



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

$$f_c = \frac{N}{A_n \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\lambda}{C_k} \right]^3 \right)} \leq F_c'$$

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 mm².

F_c' = esfuerzo admisible en compresión paralela a las fibras, modificado, en MPa.

λ = relación de esbeltez del elemento.

C_k Esbeltez que marca el límite entre columnas intermedias y largas (véase sección 1.4.2.3).

Esfuerzos máximos en columnas largas ($C_k < \lambda < 150$). El valor de esfuerzo máximo en columnas clasificadas como largas, se calcula con la expresión:

$$f_c = 3.3 \frac{E_{0.05}}{\lambda^2} \leq F_c'$$

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

λ = relación de esbeltez del elemento.

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

F_c' = esfuerzo admisible en compresión paralela a las fibras, modificado, en MPa.

No se permiten columnas con esbeltez superior a 150.

➤ DISEÑO DE ELEMENTOS SOLICITADOS POR FLEXIÓN Y CARGA AXIAL.

Flexión Y Tensión Axial. Si se presentan efectos simultáneos de carga axial por tensión y flexión deben cumplirse de tal manera que satisfagan la siguiente condición:

$$\frac{f_t}{F_t'} + \frac{f_b}{F_b'} \leq 1.0$$

f_t = esfuerzo a tensión actuante, en MPa.

F_t' = esfuerzo de tensión admisible, modificado por los coeficientes a que haya lugar, en MPa.

f_b = Esfuerzo a la flexión actuante, en MPa.

F_b' = Esfuerzo admisible modificado por flexión, en MPa.

Compresión y Compresión Axial. Los elementos de la estructura que se encuentren sometidos simultáneamente a fuerzas de compresión y flexión deben ser diseñados para cumplir a siguiente ecuación:



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

$$\frac{f_c}{F_c'} + \frac{k_m f_b}{F_b'} \leq 1.0$$

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

F_c' = esfuerzo de compresión paralela a la fibra admisible, modificado por los coeficientes a que haya lugar, en MPa.

f_b = Esfuerzo a la flexión actuante, en MPa.

F_b' = Esfuerzo admisible modificado por flexión, en MPa.

k_m = coeficiente de magnificación de momentos, calculado con la fórmula siguiente:

$$k_m = \frac{1}{1 - 1.5 \left(\frac{N_a}{N_{cr}} \right)}$$

Dónde:

k_m = coeficiente de magnificación de momentos.

N_a = carga de compresión actuante, en N.

N_{cr} = carga crítica de Euler, calculada con la fórmula

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_{0.05} I}{l_e^2}$$

Siendo:

N_{cr} = carga crítica de Euler, en N.

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

I = momento de inercia de la sección, en mm⁴.

l_e = longitud efectiva del elemento, en mm.

Una vez conocidos los resultados del modelo estructural, se procede al diseño de cada uno de los elementos del puente, acudiendo a las recomendaciones del título G.12 de la NSR-10, utilizando un cuadro Excel resumen de las expresiones para el cálculo de elementos en guadua, producidas por el Ing. Rodolfo Felizzola Contreras,²⁴ se procede al cálculo y chequeo de cada uno de los elementos del puente. Como se observa en la **Tabla 18**.²⁵

²⁴ Ing. Felizzola R., 2017. Profesor de la Universidad Distrital de Colombia, Sede Bogotá.

²⁵ Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 19 marzo 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Título G.12. Bogotá, Colombia. Utilizando un cuadro Excel resumen de las expresiones para el cálculo de elementos en guadua, producidas por el Ing. Rodolfo Felizzola Contreras.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

La **Tabla 18** está compuesta de las siguientes partes:

Capítulo 1, Elemento: Se escribe el número de elemento analizado obtenido en SAP2000. En la zona de datos se ingresa las cargas provenientes del diseño SAP2000 para el elemento analizado.

Capítulo 2, Elementos solicitados a Compresión: Apartado dedicado a las propiedades geométricas de la sección utilizada (cantidad de culmos, diámetros, longitud, coeficiente de longitud efectiva, inercia, área, radio de giro, esbeltez y módulo de la sección).

Capítulo 3, Propiedades mecánicas de la guadua a diseñar: Se relacionan los módulos de (elasticidad promedio, percentil 5 y mínimo) y los esfuerzos admisibles a (flexión, tracción, compresión paralela al eje longitudinal, compresión perpendicular al eje longitudinal y corte), esta información es extraída de la NSR-10.

Capítulo 4, Coeficientes de modificación: se ingresa las propiedades mecánicas de la guadua (según sección G.12.7 del reglamento).

Capítulo 5, Propiedades del material afectados por los coeficientes de modificación: Son los esfuerzos admisibles los cuales serán afectados por los coeficientes de modificación de capítulo 4.

Capítulo 6, Revisión por compresión Axial: Se calcula el esfuerzo a compresión actuante aplicando las formulas en la sección G.12.9,2 y la compara contra el esfuerzo a compresión existente. Si resulta el esfuerzo actuante inferior al resistente, la hoja dará un “Ok” de lo contrario, indicará “No Cumple” y será necesario cambiar la cantidad de culmos.

Capítulo 7, Revisión por flexo-compresión: Simultáneamente se revisa un esfuerzo combinado por flexión y compresión. Si la combinación de porcentajes de uso del material por compresión y flexión supera el 100% (o coeficiente igual o superior a 1.00) será necesario cambiar la sección de la pieza analizada. Esto depende si el elemento es tipo viga o columna, por lo general este paso aplica para la columna.

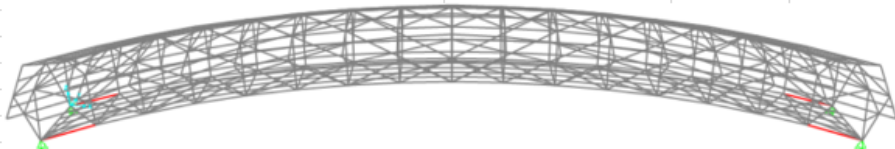
Capítulo 8, Elementos solicitados a Tensión: Conforme a los datos ingresados inicialmente en el capítulo 1 “Elemento”. Esta hoja de cálculo hace la revisión por tensión del elemento, mediante otra comparación, pero esta vez por esfuerzos a tensión.

Por lo anterior se puede decir que, esta hoja de cálculo en Excel fue creada para simplificar la resolución de las ecuaciones en los diferentes procedimientos para el diseño estructural de elementos por el método de esfuerzos admisibles como lo define el Título B del reglamento sismo resistente de construcción sismoresistente NSR-10.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA "ANGUSTIFOLIA KUNT"

Tabla 18: Cuadro de cálculo de elementos en Guadua. Fuente: Ing. Rodolfo Felizzola Contreras. 2017. Profesor de la Universidad Distrital de Colombia, Sede Bogotá.

			
1.0	ELEMENTO	ARCO INFERIOR EXTREMOS 1	Tipo de solicitación
	Longitud del elemento (m)	1,17	Sección
	Solicitación a compresión (kN)	356,37	
	Solicitación a Tensión (kN)	104,27	
	Solicitación a flexión (kN * m)	3,61	
	Solicitación cortante (kN)	4,15	
2.0	ELEMENTOS SOLICITADOS A COMPRESIÓN		
	PROPIEDADES DEL ELEMENTO		
	Numero de Culmos	11	
	Diametro externo[D]	100 mm	
	Diametro interno[d]	80 mm	
	Espesor [t]	10 mm	
	Long. no soportada lateralmente, lu	1,1700 m	
	Coefficiente de long. Efectiva, k	1	
	Longitud efectiva [Le]	1,17 m	
	Inercia [I]	2,90E-06 m4	
	Inercia total [I]	6,23E-04 m4	
	Area neta [A]	2827,43 mm2	
	Area neta total [A]	31101,77 mm2	
	Radio de giro [r]	141,54 mm	
	Esbeltez, ck	59,37	
	Esbeltez [l]	8,27 col. Corta	
	Modulo de seccion [s]	2405000,00 mm3	
Tabla 13.2.1 Coeficiente de longitud efectiva (k) Condición de los apoyos Arco extremos articulados (Arco extremos del elemento restringidos al desplazamiento perpendicular a su eje longitudinal) Un extremo con restricción a la rotación y al desplazamiento y al otro libre * Cuando se justifique apropiadamente, se pueden utilizar valores de k, de la tabla 13.2.1.			
1.1	3.0 PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR-10)		
Sección T1	Modulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500 MPa	
	Modulo percentil 5 [E0.05]	7500 MPa	
	Modulo minimo [Emin]	4000 MPa	
	Esf. Admisible a flexion [Fb]	15 MPa	
	Esf. Admisible a traccion [Ft]	18 MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [Fc]	14 MPa	
Sección T2	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4 MPa	
	Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2 MPa	
	4.0 COEFICIENTES DE MODIFICACION		
	Por duracion de carga [CD]	1	
	Por contenido de humedad [Cm]	1	
Sección T3	Por temperatura [Ct]	1	
	Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1	
	Por forma [CF]	1,12	
	Por redistribucion de cargas [Cr]	1	
	Por estabilidad de columnas [Cp]	1	
Sección T4	Por cortante [Cc]	1	
	5.0 Propiedades del material afectados por los coeficientes de modificación		
	Esf. Admisible a flexion [F'b]	16,8 MPa	
	Esf. Admisible a traccion [F't]	18 MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [F'c]	14 MPa	
Sección T5	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4 MPa	
	Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2 MPa	
	6.0 Revision por compresion axial		
	Esfuerzo maximo, fc	11,46 MPa	cumple



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA "ANGUSTIFOLIA KUNT"

Sección T6	7.0 Revision por flexocompresion			
	Fuerza de compresion actuante, Na	356,3700	kN	
	Momento actuante	3,6100	kN.m	
	Esbeltez Ck	59,37	col. Corta	
	Esf. de compresion paralelo a la fibra actuante [fc]	11,46	MPa	
	Esf. de flexion actuante [fb]	1,5	MPa	
	Carga critica de euler, Ncr	33688163	N	
Sección T7	Coefficiente de magnificacion de momentos [km]	1,02		
	Relacion	0,91	OK	
				$\frac{f_c + k_m f_b}{F_c F_b} \leq 1,0$
8 ELEMENTOS SOLICITADOS A TENSION				
PROPIEDADES DEL ELEMENTO				
	Numero de Culmos	11,00		
	Diametro externo[D]	100,00	mm	
	Diametro interno[d]	80,00	mm	
	Espesor [t]	10,00	mm	
	Long. no soportada lateralmente, lu	1,17	m	
	Coefficiente de long. Efectiva, k	1,00		
	Longitud efectiva [Le]	1,17	m	
	Inercia [I]	2,90E-06	m4	
	Inercia total [I]	6,23E-04	m4	
	Area neta [A]	2827,43	mm2	
	Area neta total [A]	31101,77	mm2	
	Radio de giro [r]	141,54	mm	
	Esbeltez, ck	59,37		
	Esbeltez [I]	8,27	col. Corta	
	Modulo de seccion [s]	2405000,00	mm3	
9 PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR10)				
	Modulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500	MPa	
	Modulo percentil 5 [E0.05]	7500	MPa	
	Modulo minimo [Emin]	4000	MPa	
	Esf. Admisible a flexion [Fb]	15	MPa	
	Esf. Admisible a traccion [Ft]	18	MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [Fc]	14	MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4	MPa	
	Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2	MPa	
10 COEFICIENTES DE MODIFICACION				
	Por duracion de carga [CD]	1		
	Por contenido de humedad [Cm]	1		
	Por temperatura [Ct]	1		
	Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1		
	Por forma [CF]	1,12		
	Por redistribucion de cargas [Cr]	1		
	Por estabilidad de columnas [Cp]	0,57		
	Por cortante [Cc]	1		
11 Propiedades del material afectados por los coeficientes				
	Esf. Admisible a flexion [F'b]	16,8	MPa	
	Esf. Admisible a traccion [F't]	18	MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [F'c]	7,98	MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4	MPa	
	Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2	MPa	
12 Revision por flexocompresion				
	Fuerza de tension axial aplicada, T	104,2700	kN	
13 Revision por tension axial				
	Esfuerzo a tension actuante, ft	3,35	MPa	
			Cumple	



6. UNIONES

La generalidad que establece el G.12.11 Uniones de la NSR-10, son aplicables a las uniones contenidas en la NTC-5407 “Uniones de estructuras con Guadua Angustifolia Kunth”. 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 guadua se deben tomar las medidas necesarias para evitar que estos induzcan a la falla de la unión.

Recomendación G.12.11.1.1 – en ningún caso se permitirá uniones clavadas, ya que los clavos inducen grietas longitudinales debido a la disposición de las fibras de la guadua.

6.1 TIPOS DE CORTES – G.12.11.2

Los tres tipos de cortes más utilizados para la fabricación de uniones con elementos de guadua, son: Corte recto **Figura 13**, corte boca de pescado **Figura 14** y corte pico de flauta **Figura 15**.

Figura 13: Corte Recto. Fuente NSR-10.

G.12.11.2.1 — **Corte recto** — Corte plano perpendicular al eje de la guadua



Figura G.12.11-1 - Corte Recto



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 14: Corte Boca de pescado. Fuente NSR-10.

G.12.11.2.2 — Corte boca de pescado — Corte cóncavo transversal al eje de la guadua, generalmente se utiliza para acoplar dos elementos de guadua.

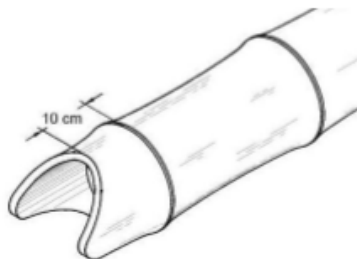


Figura G.12.11-2 - Corte Boca de pescado

Figura 15: Corte Pico de flauta. Fuente NSR-10.

G.12.11.2.3 — Corte pico de flauta — Este corte se utiliza para acoplar guaduas que llegan en ángulos diferentes a 0° y 90° , se puede hacer como una boca de pescado inclinado o con dos cortes rectos.

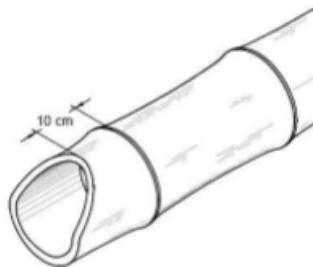


Figura G.12.11-3 - Corte Pico de flauta

6.2 UNIONES EMPERNADAS (G.12.11.3)

Estas disposiciones son aplicables a uniones empernadas de dos o más elementos de guadua o a uniones de elementos de guadua con platinas metálicas o para la fijación de guadua a elementos de concreto por medio de la platina y anclas. Las uniones empernadas se utilizan generalmente cuando las solicitudes sobre una conexión son relativamente grandes, requiriendo por lo tanto el uso de pernos, normalmente acompañados de platinas de acero.

G.12.11.3.1. Los pernos y las platinas usados en las conexiones empleadas deben ser de acero estructural con refuerzo de fluencia no menor de 240 MPa; el diámetro mínimo permitido para los pernos es de 9,5mm (#3) y el espesor mínimo de las platinas será de 4,8mm (3/16). Todos los elementos metálicos de las uniones deben ser diseñados según lo estipulado por el Título F de la presente norma.



G.12.11.3.2. Las perforaciones hechas para la colocación de un perno deben estar bien alineadas respecto al eje del mismo y tener un diámetro mayor al diámetro del perno de 1,5mm (1 1/16). Las perforaciones hechas para el relleno de los entrenudos deben tener un diámetro máximo de 26mm, y deben ser debidamente tapadas con el mismo mortero de relleno, para que se garantice la continuidad estructural del elemento. En caso de una unión emperrada longitudinalmente respecto al eje de la guadua, se debe garantizar que no se presente la falla de los tabiques involucrados en la conexión.

G.12.11.3.3. Todos los pernos y demás elementos metálicos de la unión deben estar diseñados de acuerdo a los requisitos estipulados en el Título F de la presente norma y en el caso en que la unión sea entre un elemento de guadua y otro de concreto, la longitud e anclaje debe ser tal que cumpla con las exigencias del Título C de la misma norma. Todos los elementos metálicos usados en uniones emperradas que estarán expuestas a condiciones ambientales desfavorables deben tener algún tipo de tratamiento anticorrosivo.

G.12.11.3.4. Es permitido el uso de abrazaderas o zunchos metálicos 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. Como se observa en la **Figura 16**.

Figura 16: Zunchos. Fuente NSR-10.

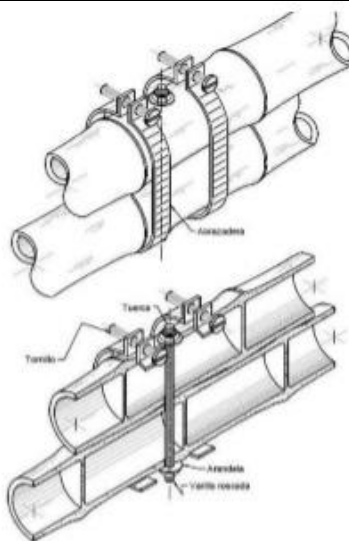


Figura G.12.11-4 - Zunchos



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

G.12.11.3.5 En el caso de uniones en las cuales los culmos de guadua 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 a 3, preferiblemente con un aditivo plastificante que garantice la fluidez de la mezcla. El mortero usado para relleno de entrenudos debe ser tipo M o S, de acuerdo a la clasificación de morteros estipulada en el Título D de la presente Norma.

G.12.11.3.6 En toda unión empernada que carezca de platinas, se deben utilizar arandelas metálicas entre la tuerca y la guadua o entre la cabeza del perno y la guadua, de acuerdo con la tabla G.12.11-1. Ver siguiente **Tabla 19**.

Tabla 19: G12.11-1 Dimensiones mínimas de arandelas para uniones empernadas. Fuente NSR-10.

Tabla G.12.11-1
Dimensiones mínimas de arandelas para uniones empernadas

Diámetro del perno (mm)	9.5	12.7	15.9
Espesor de la arandela (mm)	4	5	6
Diámetro externo arandelas (mm)	45	50	65

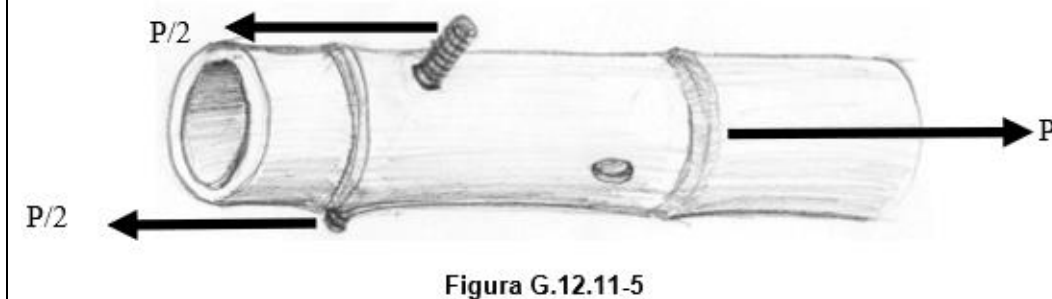
G.12.11.3.7 Todos los elementos metálicos utilizados en uniones empernadas, construidas con elementos de guadua húmeda ($CH > 30\%$), o sometidos a ambientes húmedos o con alto contenido de salinidad deben tener un tratamiento anticorrosivo.

G.12.11.3.8 Las cargas admisibles para uniones empernadas sometidas a cizallamiento doble se determinarán a partir de los valores P, Q y T dados en la tabla G.12.11-2, en función del diámetro exterior de la guadua (D_e) y del diámetro del perno (d).

Los valores de P indicados serán utilizados cuando la fuerza en la unión sea paralela a las fibras, tanto del elemento central como de los elementos laterales si los hubiese. Como se observa en la **Figura 17**.

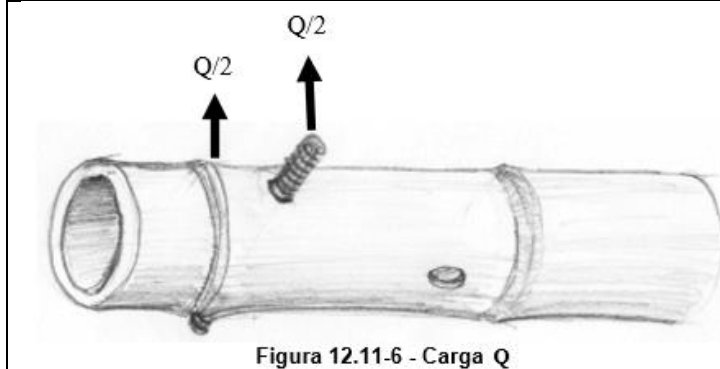


Figura 17: G.12.11-5. Fuente NSR-10.



La Carga P. son las cargas admisibles cuando la fuerza es paralela a las fibras del elemento central pero perpendicular a las fibras de los elementos laterales, o viceversa, se indican como Q, siempre y cuando el elemento central y los elementos laterales se encuentren en planos paralelos. Como se observa en la **Figura 18**.

Figura 18: 12.11-6 – Carga Q. Fuente NSR-10.



Las cargas admisibles cuando la fuerza es perpendicular a las fibras de uno de los elementos y paralela a las fibras en el otro se indican como T, siempre y cuando los elementos de guadua estén en el mismo plano. Como se observa en la **Figura 19**.



Figura 19: G.12.11-7. Fuente NSR-10.

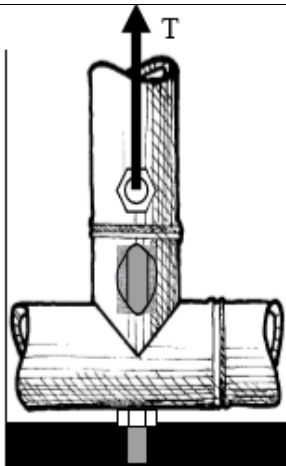


Figura G.12.11-7 - Carga T

Las cargas admisibles P y Q corresponden a dos situaciones límites. Si la fuerza en la unión sigue la dirección del elemento central, pero forma un ángulo α con la dirección de las fibras de los elementos laterales, o viceversa, la carga admisible se determinará mediante la ecuación de Hankison:

$$N = \frac{PQ}{P \sin^2 \alpha + Q \cos^2 \alpha} \quad (\text{G.12.11-1})$$

G.12.11.3.9 — Los valores de la tabla G.12.16, corresponden a uniones con un solo entrenudo entre el perno y el extremo del elemento. Si hay dos o más entrenudos entre el perno y el extremo del elemento, los valores de la tabla G.12.11-2 se podrán incrementar en un 30%, es decir el coeficiente de modificación por este concepto es de 1.3. Los valores de Q y T no se pueden modificar.

G.12.11.3.10 — Las cargas admisibles dadas en la tabla G.12.11-2 son representativas de guaduas con un contenido de humedad inferior al 19% y que se mantendrán secas durante su tiempo de servicio. En conexiones de 4 o más miembros cada plano de corte será evaluado como una conexión de cizallamiento simple. El valor de la conexión se calculará con el valor nominal más bajo así obtenido, multiplicado por el número de planos de corte.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 20: Cargas admisibles para uniones empernadas con doble cizallamiento. Fuente NSR-10.

Tabla G.12.11-2
Cargas admisibles para uniones empernadas con doble cizallamiento

Perno	De (mm)	P (N)	Q (N)	T (N)
#3	80	7212	2885	2000
	90	8008	3203	2100
	100	8804	3522	2200
	110	9601	3840	2300
	115	10041	4016	2400
	120	10481	4193	2500
	125	10922	4369	2600
	130	11362	4545	2700
	135	11802	4721	2800
	140	12242	4897	2900
	150	13039	5216	3000
#4	80	9710	3884	2000
	90	9916	3966	2100
	100	10943	4377	2200
	110	11970	4788	2300
	115	12521	5009	2400
	120	13072	5229	2500
	125	13623	5449	2600
	130	14174	5670	2700
	135	14725	5890	2800
	140	15276	6110	2900
	150	16303	6521	3000
#5	80	11540	4616	2000
	90	12806	5122	2100
	100	13250	5300	2200
	110	14515	5806	2300
	115	15185	6074	2400
	120	15855	6342	2500
	125	16525	6610	2600
	130	17195	6878	2700
	135	17865	7146	2800
	140	18535	7414	2900
	150	19800	7920	3000

G.12.11.3.11 — Las cargas admisibles de la tabla G.12.11-2 corresponden a uniones con un solo perno (Ver la **Tabla 20** ubicada anteriormente). Cuando una unión requiera más de dos pernos en línea paralela a la dirección de la carga, la carga admisible de la unión se obtendrá multiplicando los valores admisibles por perno obtenidos de dicha tabla, por el número de pernos y por un coeficiente de reducción por grupo, C_g , de acuerdo a la tabla G.12.11-3. Ver la siguiente **Tabla 21**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 21: Coeficiente de reducción por grupo C_g . Fuente NSR-10.

Tabla G.12.11-3
Coeficiente de reducción por grupo C_g

Clase de unión	Numero de pernos				
	2	3	4	5	6
Uniones con elementos de guadua	1.0	0.97	0.93	0.89	0.82
Uniones con elementos de acero	1.0	0.98	0.95	0.92	0.90

El coeficiente de reducción por grupo solo puede aplicarse a la carga P, la carga Q y T no se pueden modificar.

G.12.11.3.12 — Si se utilizan arandelas de forma cóncava que permitan una mejor distribución de la carga en las paredes de la guadua y siempre y cuando los cañutos donde estas estén ubicadas estén rellenos de mortero de cemento se podrán incrementar las cargas de la tabla G.12.16 en un 25%, los valores de Q no se pueden incrementar.

G.12.11.3.13 — El espaciamiento entre los pernos no debe ser inferior a 150 mm ni superior a 250 mm, en todo caso debe existir un entrenudo entre cada perno. La distancia desde el perno hasta el extremo libre del elemento debe ser superior a 150 mm en uniones sometidas a tracción y 100 mm en uniones sometidas a compresión.

6.3 OTRAS UNIONES (G.12.11.4)

Se permitirán otros tipos de uniones, siempre y cuando estas sean verificadas por un estudio científico con no menos de 30 ensayos, que permita verificar que la capacidad de la unión propuesta es equivalente o superior a las expuestas en la presente norma.²⁶

²⁶ Incontec Internacional. 2018. NTC 5407. Uniones de Estructuras con Guadua Angustifolia Kunth. Bogotá - Colombia. Incontec.



7. ESTUDIO DE CASO N° 1 - MODELO ESTRUCTURAL

7.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

7.1.1 MODELO ESTRUCTURAL

El análisis estructural fue desarrollado en el programa SAP2000 V.20 el cual fue desarrollado por Computers and Structures Inc, compañía que lleva desde el año 1975 desarrollando herramientas computacionales que permiten realizar el análisis y diseño en el área de la ingeniería estructural y sísmica. El programa emplea el método de los elementos finitos para obtener los resultados del análisis de cada uno de los elementos modelados.

La estructura se idealiza mediante un modelo tridimensional linealmente elástico, en donde los elementos son modelados mediante elementos tipo frame. Para cada elemento se definen tanto sus propiedades geométricas como el tipo de material a emplear en el análisis y diseño. Teniendo en cuenta el tipo de conexión a emplear se asignan “releases” a todos los elementos que se conectan a los 3 arcos principales, de modo que no se presenten momentos flectores en los nudos.

Los apoyos en la base son considerados como empotrados según lo permitido por el reglamento NSR.10. Los diafragmas de entrepiso son considerados como diafragmas rígidos. Los diagramas de entrepiso son considerados rígidos en su plano.

7.1.2 EFFECTOS ORTOGONALES

De acuerdo a lo establecido en el reglamento NSR-10 en A.3.6.3. y el decreto 340 de 2012 se deben tener en cuenta los efectos ortogonales. Estos efectos se tienen en cuenta suponiendo la concurrencia simultánea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% de las fuerzas sísmicas en la dirección perpendicular.

7.1.3 CARGAS

En primer lugar, se definen todos los patrones de cargas necesarios para el adecuado análisis estructural del puente. Como se observa en la **Tabla 22**.

Tabla 22: Definición de patrones de Carga. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.

Caso de carga	Abreviación	Tipo de carga
Peso propio	PP	Muerta
Sobreimpuesta	DL	Muerta
Peatonal carril 1	Lp1	Viva
Peatonal carril 2	Lp2	Viva
Bicicletas y motos carril 1	Lb1	Viva



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Bicicletas y motos carril 2	Lb2	Viva
Ecuestre carril 1	Leq1	Viva móvil
Ecuestre carril 2	Leq2	Viva móvil
Vehicular	Lc	Viva móvil
Viva de cubierta	Lr	Viva
Granizo	G	Viva
Empozamiento	Le	Viva
Viento	W	Viento
Sismo	Ex Ey	Sismo

7.1.3.1 CARGAS GRAVITACIONALES

Las cargas gravitacionales empleadas en el modelo, son: la carga muerta, la carga viva, la carga de granizo y la carga de empozamiento. Para la carga muerta, aunque el programa SAP2000 permite dentro del caso de carga muerta considerar el efecto del peso propio de los elementos, se define aparte un caso de carga denominado PP, con el objeto de poder determinar la magnitud del peso de los elementos y su participación en la carga muerta total.

En la carga muerta se incluyen como carga sobreimpuesta, el peso de los acabados, rellenos sobre las placas (si existen), cielorasos, peso de las particiones que existen sobre las placas, para estas particiones se realiza un análisis detallado el cual hace parte integral de la memoria, entre otros.

Las cargas vivas, granizo y de empozamiento son las especificadas por la NSR-10, EL CCP14 y LRFD Guide Specifications for the Design Bridges. 2009.

7.1.3.2 MUERTA

La carga muerta se calcula con base a los materiales existentes en el puente. La siguiente **Tabla 23**, **Tabla 24** y **Fotografía 22**, **Fotografía 23** muestran la carga aplicada sobre la cubierta.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 22: cubierta del puente. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.



Tabla 23: Cargas muertas en cubierta. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.

Elemento	Valor de Carga (kg/m ²)	Valor de Carga (kN/m ²)	Carga Lineal* (kN/m)
Teja de Barro	31.30	0.307	0.298
Polines de Madera @0.80m	0.94	0.009	0.009
Correa de Guadua @0.60m	6.23	0.061	0.059
TOTAL	38.47	0.377	0.37

*Carga lineal calculada multiplicando la carga de área por una aferencia de 0.97m (distancia de correas en el modelo)



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Fotografía 23: tablero inferior del puente. Fuente: JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.



Tabla 24: Cargas muertas en tablero inferior. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019.

Elemento	Valor de Carga (kg/m ²)	Valor de Carga (kN/m ²)	Carga Lineal* (kN/m)
Losa e=10cm (+/- 1cm)	240	2.40	1.68
Correa de Guadua @0.75m	4.99	0.05	0.035
Esterilla	9.00	0.09	0.063
TOTAL	253.54	2.54	1.78

*Carga lineal calculada multiplicando la carga de área por una aferencia de 0.70m (distancia de correas en el modelo)

También se ha hecho una evaluación del volumen total de mortero inyectado en la estructura, la cual suma un total de 3.26m³, el cual ofrece un total de 70.33 kN (tomando una densidad de mortero inyectado para mampostería de 2250 kg/m³). Esta carga se repartirá como una carga linealmente distribuida entre los arcos superior e inferior de cada cara lateral, de la siguiente manera:

$$Carga / Cara Lateral = \frac{70.33kN}{2 caras} = 35.17kN$$

$$Carga sobre cara / 2 Arcos = \frac{35.17kN}{2 arcos} = 17.58kN$$



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

$$\text{Carga sobre arco} / \text{Long. de arco sup} = \frac{17.58kN}{43.21m} = 0.41 \frac{kN}{m}$$

$$\text{Carga sobre arco} / \text{Long. de arco inf} = \frac{17.58kN}{41.02m} = 0.43 \frac{kN}{m}$$

Esta carga se añadirá a la carga muerta previamente calculada para el tablero y para la cubierta, se aplicará directamente sobre el arco superior, mientras que las cargas muertas calculadas de la misma en el numeral anterior se aplican directamente sobre las correas. Por tanto, la carga muerta sobre los arcos inferiores será de:

$$D_{ARCO INFERIOR} = 4.83 \frac{kN}{m} + 0.43 \frac{kN}{m} = 5.26 \frac{kN}{m}$$

7.1.3.3 PEATONAL

De acuerdo a lo establecido en la sección 3.6.1.6 del CCP-14 la carga viva peatonal será de 3.6kN/m². Al igual que en el caso de la carga muerta, se multiplicará por aferencia de las correas para obtener así un valor de carga linealmente distribuida.

$$L_p = \left(3.6 \frac{kN}{m^2} \right) (0.70m) = 2.52 \frac{kN}{m}$$

7.1.3.4 MOTOS Y BICICLETAS

Para el caso de motos y bicicletas se toma como referencia lo citado por el manual abreviado para diseño de puentes para peatones y bicicletas holandés²⁷, el cual describe que para el caso de bicicletas se puede emplear bien sea el caso de una carga de superficie 5kN/m² o una carga puntual dinámica de 7kN aplicada sobre una superficie de 10x10cm²⁸. Si el puente presenta luces con longitudes mayores a 10m, se puede calcular la carga mediante la siguiente ecuación:

$$L_b = 2.0 + \frac{120}{L_{puente} + 30} \text{ en } \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

Siendo L_b la carga viva por bicicleta y L_{puente} la longitud total del puente. En ningún caso la carga calculada deberá ser inferior a los 2.5kN/m². Cabe destacar que al igual que en los otros tipos de carga viva estudiados en este documento, su aplicación está condicionada a la accesibilidad de las bicicletas o motos al puente.

²⁷ Ipv delft. vertical loads. en: brief dutch design manual for bicycle and pedestrian bridges. ver. 1.3. 2015. p. 38 y 39.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Teniendo en cuenta que el puente de estudio tiene una luz de 40m se emplea la ecuación mencionada anteriormente.

$$L_b = 2.0 + \frac{120}{40 + 30} = 3.71 \frac{kN}{m^2}$$

De igual forma, se emplea la aferencia entre correas para obtener una carga uniformemente distribuida sobre las mismas.

$$L_b = \left(3.71 \frac{kN}{m^2} \right) (0.70m) = 2.59 \frac{kN}{m}$$

7.1.3.5 ECUESTRE

Carga viva por tránsito de animales de carga o transporte de pasajeros. Esta carga según la norma estudiada ²⁹ tendrá un valor de 1.00 kips sobre un área de 16 pulg² (equivalente a una carga dinámica de 4.48kN). Esta carga debe considerarse cuando exista viabilidad de acceso de esta clase de cargas al puente.

Para aplicar cargas móviles en el modelo primero es necesario definir unos caminos de carga, un vehículo y asociarlo a una clase. A continuación, se describe de forma general la metodología empleada.

²⁹ American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. 2009. Equestrian Loads. En: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges. P.5.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 20: Definir “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

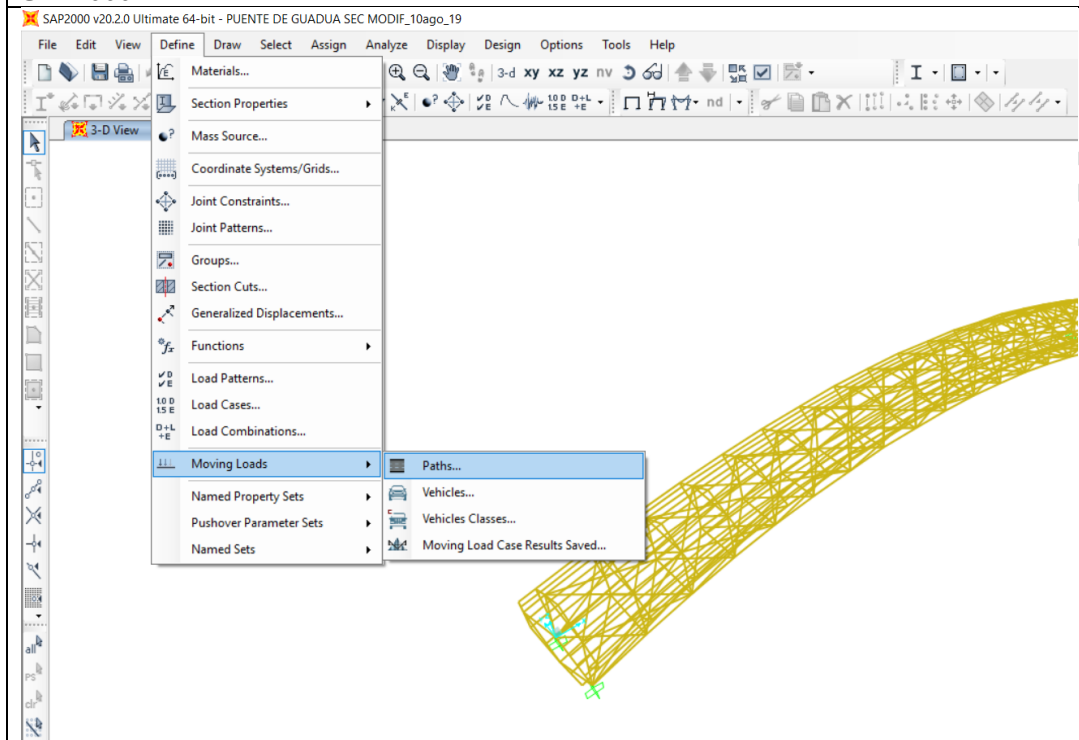
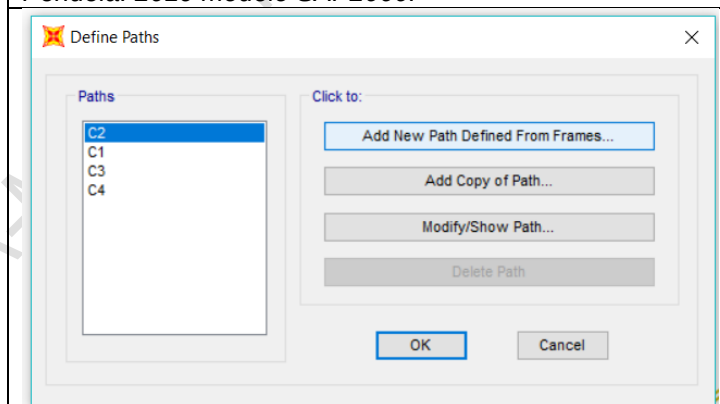


Figura 21: Crear “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.





METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 22: Definir parámetros “path”. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Frame	Centerline Offset
1	0

Discretization

Maximum Discretization Length: 120.

☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 10. of Path Length

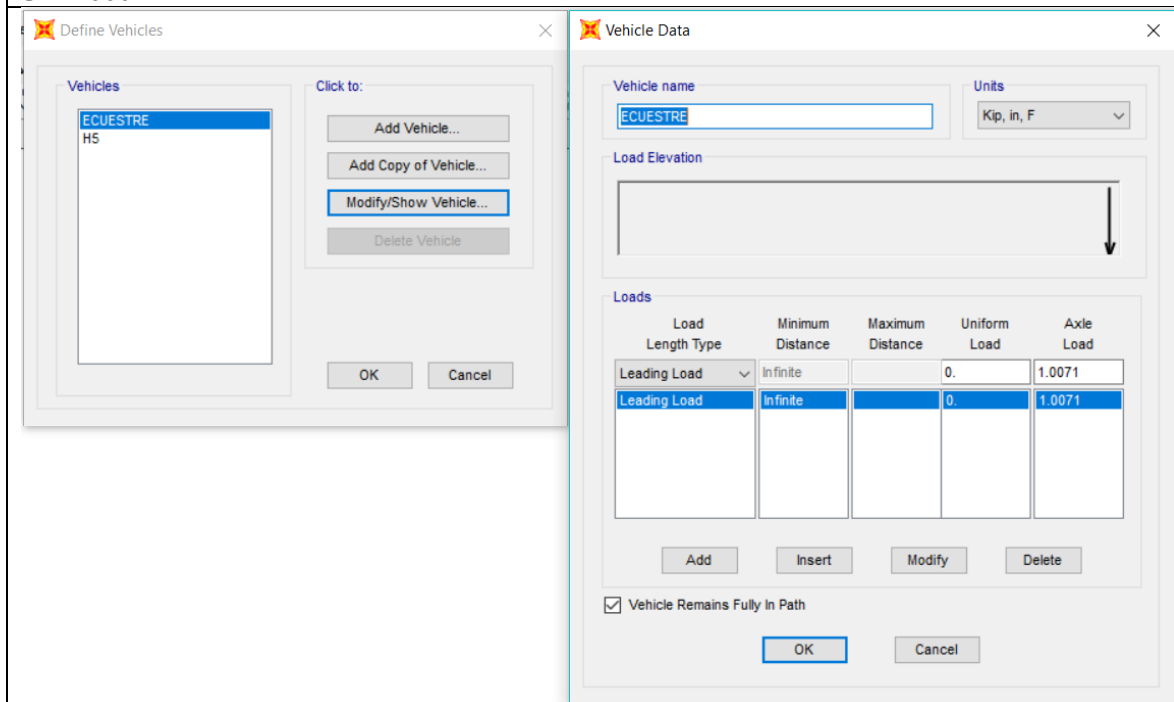
El primer paso para definir una carga móvil es definir un camino o “path”. En la **Figura 20**, **Figura 21** y **Figura 22**, se puede apreciar el menú de acceso, posteriormente en los cuadros “Define path” y “Path data” se crea un nuevo camino y se asignan los datos de entrada. En la columna “frame” se incluyen las etiquetas de los elementos que definen el camino; en “centerline” offset se indica si el camino presenta alguna excentricidad respecto al elemento y en “discretization” se indica en el número de partes que se quiere dividir el camino. El procedimiento anteriormente mencionado se empleó para definir 4 caminos utilizando las 4 correas del tablero inferior.

Una vez definidos los caminos se procede con el vehículo, en este caso se asigna únicamente una carga puntual de 4.48kN. Ver **Figura 23**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 23: Definición vehículo ecuestre. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.



7.1.3.6 VEHICULAR

La guía para diseño de puentes peatonales de la AASHTO contempla también el paso eventual de un vehículo de mantenimiento. A continuación, se muestran las dimensiones que tiene el vehículo, junto con **Tabla 25**, la cual muestra el valor de carga que debe ofrecer el vehículo en función del ancho de tablero. Cabe destacar que al igual que en el caso de las cargas vivas ecuestres, este tipo de carga debe analizarse solamente cuando exista la viabilidad de acceso del vehículo de diseño, como se observa en la **Figura 24**.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 24: Vehículo de diseño para puentes peatonales Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.

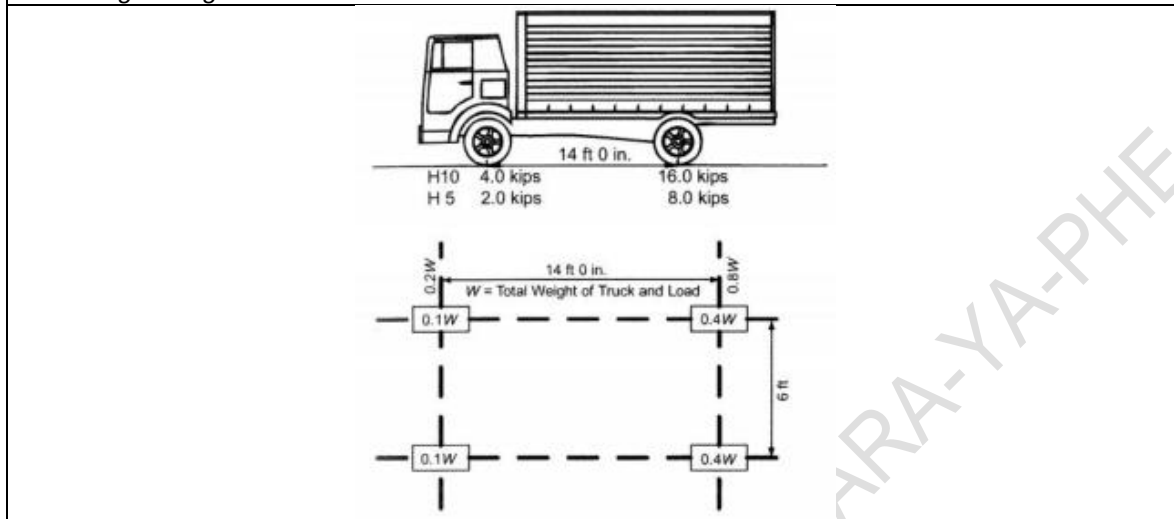


Tabla 25: Vehículo empleado según ancho del tablero Fuente: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges.

Ancho libre de tablero	Vehículo de Diseño
2.10m a 3.0m	H5
Mayor a 3.0m	H10

Como ya se habían definido los caminos de carga solo es necesario incluir el vehículo de diseño. Teniendo en cuenta que el ancho efectivo del puente de estudio es de 3m se ha decidido emplear el camión H5. A continuación en la **Figura 25**, se presenta la definición del vehículo en el software.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 25: Definición vehículo H5. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	Infinite		0.	2.
Leading Load	Infinite		0.	2.
Fixed Length	168.		0.	8.

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete. ☐ Vehicle Remains Fully In Path. OK, Cancel.

Una vez definidos los vehículos y los caminos se deben crear los patrones y casos de carga para cargas móviles. Allí se puede apreciar cómo se distribuye la carga del vehículo en los 4 caminos asignando porcentajes iguales de 25% cada uno. (Ver **Figura 26**, **Figura 27** y **Figura 28**).

Figura 26: Definición de patrones de carga. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
Lc	Vehicle Live	0	
Lb2	Live	0	
Lr	Live	0	
G	Live	0	
Le	Live	0	
W	Wind	0	None
Ex	Quake	0	None
Ey	Quake	0	None
Leq1	Vehicle Live	0	
Leq2	Vehicle Live	0	
Lc	Vehicle Live	0	

Buttons: Add New Load Pattern, Modify Load Pattern, Modify Vehicle Live Load..., Delete Load Pattern, Show Load Pattern Notes..., OK, Cancel.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 27: Definición de carga móvil. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Vehicle	Path	Start Dist	Start Time	Direction	Speed	Location
H5	C1	0.	0.	Forward	1.	
H5	C2	0.	0.	Forward	1.	
H5	C3	0.	0.	Forward	1.	
H5	C4	0.	0.	Forward	1.	
H5	C1	0.	0.	Backward	1.	
H5	C2	0.	0.	Backward	1.	
H5	C3	0.	0.	Backward	1.	

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

Duration of Loading is 10. seconds

Discretize Load every 0.1 seconds

Units: Kip, in, F

OK Cancel

Figura 28: Definición de combinación de carga vehicular. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Define Load Cases

Load Case Name: Lc, Load Case Type: Moving Load

Click to: Add New Load Case..., Add Copy of Load Case..., Modify/Show Load Case..., Delete Load Case, Display Load Cases, Show Load Case Tree...

Load Case Data - Moving Load

Load Case Name: Lc, Set Def Name, Notes, Modify/Show...

Load Case Type: Moving Load, Design...

Stiffness to Use: ☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State, ☐ Stiffness at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Loads Applied

Assign Number	Vehicle Class	Scale Factor	Min Loaded Paths	Max Loaded Paths	Paths Loaded
1	HS	1.	4	4	All

Add, Modify, Delete

Paths Loaded for Assignment 1

List of Path Definitions: C1, C2, C3, C4

Selected Path Definitions: C1, C2, C3, C4

MultiPath Scale Factors

Number of Paths Loaded	Reduction Scale Factor
1	1
2	0.25
3	0.25
4	0.25

Modify

Mass Source: MSSSRC1

OK Cancel



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

A continuación, en la **Figura 29**, **Figura 30** se presentan las cargas muertas, vivas y empujes sobre la estructura.

Figura 29: Asignación de cargas muertas puntuales. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

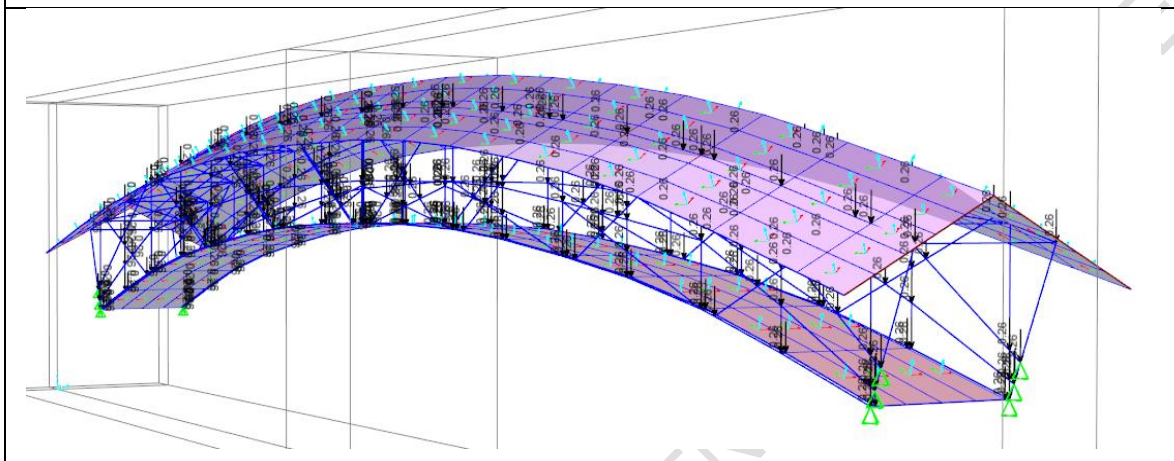
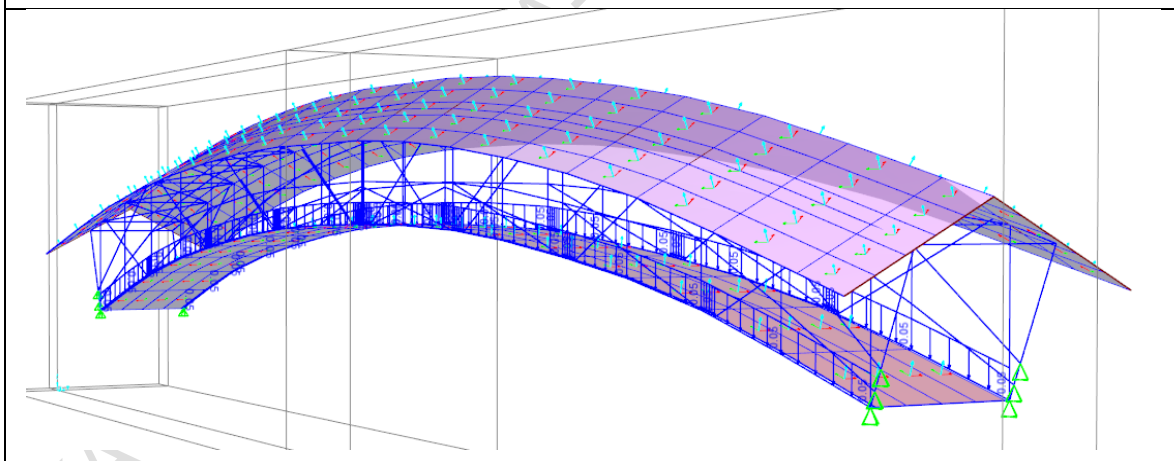


Figura 30: Asignación de cargas muertas lineales. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.



7.1.3.7 VIVA DE CUBIERTA

Teniendo en cuenta que la cubierta cuenta con un grado de inclinación de 23° , se asigna una carga de 0.35 kN/m^2 , entonces:



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

$$L_r = \left(0.35 \frac{kN}{m^2}\right) (0.97m) = 0.34 \frac{kN}{m}$$

*Carga aplicada sobre las correas para una aferencia de 0.97m.

7.1.3.8 GRANIZO

La localización del proyecto es en la ciudad de Pereira, cuya altura es de 1411 m.s.n.m. Al comparar este dato con el requisito mínimo para la evaluación de esta carga (cuya altura mínima es de 2000 m.s.n.m) se observa que este tipo de carga no es aplicable en este proyecto.

7.1.3.9 EMPOZAMIENTO

Teniendo en cuenta la configuración geométrica del puente, que incluye una cubierta inclinada y el tablero inferior en arco, no se consideran cargas de empozamiento.

7.1.3.10 VIENTO

El CCP-14 propone una presión mínima para arcos, columnas y cerchas de 2.4kN/m² en las caras sometidas a barlovento y de 1.2 kN/m² a sotavento y 1.9kN/m² para superficies planas. Como el tablero inferior se encuentra conformado por un arco y la cubierta presenta pendiente a dos aguas, no se considera la carga de viento para superficies planas. Las cargas de barlovento y sotavento se incluyen en el modelo multiplicando las presiones de diseño por el ancho de la sección expuesta para obtener cargas uniformemente distribuidas sobre los elementos.

Es importante aclarar que el código colombiano de puentes indica que esta carga es aplicable a los puentes usuales de vigas y de losa maciza que tienen una sola luz no mayor de 38m, una altura máxima de 10 m sobre el nivel del terreno y una velocidad básica de viento de 160km/h.

Por otra parte, en la NSR-10 se indica que la velocidad de diseño del viento para la ciudad de Pereira es de 80 km/h y empleando el método simplificado descrito en B.6 se obtiene una presión de diseño mínima, es decir 0.4kN/m², la sexta parte de lo empleado en el diseño.

Para elaborar un diseño conservador se toman los valores especificados en el CCP-14, sin embargo, se recomienda revisar otras normativas teniendo en cuenta la diferencia tan grande que se está presentando.

7.1.3.11 SISMO

Se escoge un suelo tipo D, se emplean los mapas y tablas de la sección 3.10 del CCP-14, Ver **Tabla 26**.



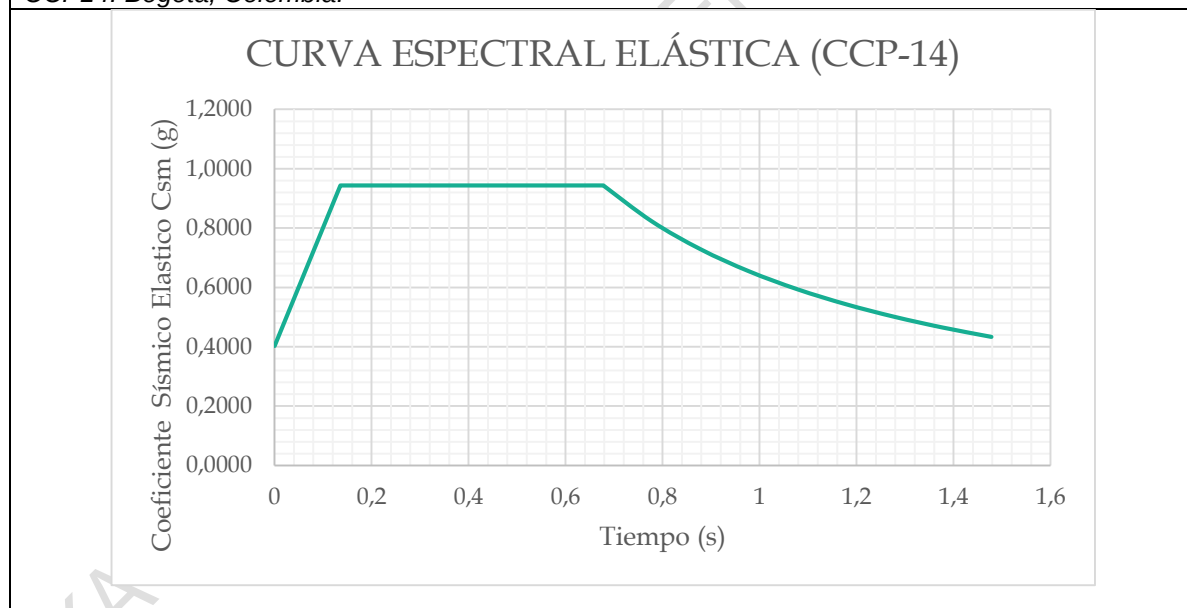
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 26: Selección tipo del suelo. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

	Coeficiente	Zona	Valor
	PGA	7	0.35
	Ss	8	0.8
	S1	8	0.4
	Fpga	D	1.15
	Fa	D	1.18
	Fv	D	1.6
	Sd1		0.64
	Sds		0.94
	Ts		0.678

Con los datos presentados se obtiene el siguiente espectro de diseño. Ver **Figura 31**.

Figura 31: Espectro de diseño. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.



Para garantizar que en el análisis dinámico participará más del 90% de la masa se incluyeron 100 modos de vibración. En dirección y (sentido transversal del puente) era suficiente con un modo, pero para alcanzar el porcentaje de participación en las otras direcciones se requería una mayor cantidad.

De acuerdo a G.12.6.1.6. el coeficiente de capacidad de disipación de energía para estructuras de guadua, cuyo sistema de resistencia sísmica sea el de pórticos con



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

diagonales será de $R_o=2.0$, sin embargo, en la literatura no existe información detallada para el caso de puentes. Con el objetivo de elaborar un diseño conservador se define un valor de $R_o=1.0$ indicando que el material y el sistema estructural permanecerán en el rango elástico siempre.

7.1.4 COMBINACIONES DE CARGA

En consideración con las combinaciones de carga propuestas tanto en la NSR-10 como en la CCP-14, se puede finalmente optar por presentar una variación de las combinaciones de carga para condiciones de servicio de la NSR-10 tomando en cuenta las condiciones del material utilizado para el proyecto, las cuales se proponen de esta manera:

D

$D + L$

$D + (L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$

$D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$

$D + W$

$D + 0.7E$

$D + 0.75W + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$

$D + 0.75(0.7E) + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$

$0.6D + W$

$0.6D + 0.7E$

Se propone la omisión de las cargas de tipo T, H y F debido a que éstas pueden aplicarse en otros puntos de la estructura, tales como pilas y estribos, los cuales al ir en otros materiales se pueden ceñir a las combinaciones de carga que proponga el CCP-14 o en su defecto las combinaciones de carga por resistencia propuestas en la sección B.2.4 de la NSR-10.

Se debe evaluar entonces bajo qué condiciones se pueden aplicar estas cargas y con ello hacer una propuesta que se acerque el máximo posible a las condiciones reales que pueda presentar el puente durante la prestación del servicio. Bajo esta premisa, se proponen 4 condiciones de carga viva combinada y 3 independientes que deben aplicarse a los puentes peatonales. Se parte de la premisa de que algunas combinaciones incluyen el uso simultáneo de dos tipos de carga viva, los cuales se aplicarán sobre cada calzada del puente. Así entonces se muestra la **Figura 32**, la cual explica mejor esta consideración de aplicación de carga viva.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Figura 32: Esquema de referencia calzadas. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

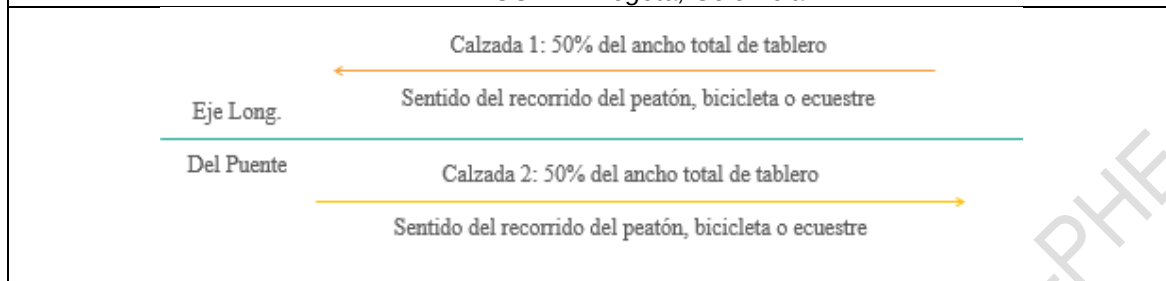


Tabla 27: Combinaciones de carga viva. Fuente: Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.

Condición de Carga	Calzada 1	Calzada 2
C_{L1}	L_P	L_b
C_{L2}	L_P	L_{EQ}
C_{L3}	L_b	L_{EQ}
C_{L4}^*	L_C	
L_1	L_P	
L_2	L_{EQ}	
L_3	L_b	

Lo anteriormente presentado indica entonces que toda combinación de carga que incluya carga viva deberá entonces derivarse en una combinación de carga adicional que incluya cada condición de carga viva propuesta en la **Tabla 27**.

7.1.5 MATERIALES

A continuación, se muestran las propiedades mecánicas del material utilizado (guadua angustifolia kunth) representado en dos tablas, la primera presenta valores diversos de módulos de elasticidad, mientras que por otra parte la segunda muestra las propiedades de resistencia mecánica utilizados durante el proceso de diseño.

Tabla 28: Módulo de elasticidad de la guadua según G.12.7.3. Fuente NSR-10.

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo E_{min}
9500	7500	4000

Como bien indica la **Tabla 28**, los valores expuestos en la anterior tabla se utilizan con diferentes propósitos. El módulo de elasticidad promedio se utiliza para el análisis de los elementos estructurales de la edificación o estructura. Por otro lado, el módulo de



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

elasticidad mínimo se utiliza con el fin de evaluar los coeficientes de modificación de las propiedades mecánicas del material en cuanto a estabilidad de vigas (C_L) y columnas (C_p). Por último, el módulo de elasticidad de percentil 5 se deberá utilizar con el fin de determinar las deflexiones cuando las condiciones de servicio sean críticas o requieran un nivel de seguridad superior al ofrecido por el promedio. Esto sugiere que para el caso de este tipo de proyecto se deberá hacer dos tipos de análisis: un primer análisis por fuerzas, utilizando el módulo de elasticidad promedio del material. El segundo análisis debe llevarse a cabo con el fin de determinar las deflexiones máximas y para esto se utiliza el módulo de elasticidad de percentil 5.

Tabla 29: Esfuerzos admisibles de la guadua con un (CH) del 12%, en MPa. Fuente NSR-10.

Flexión (Fb)	Tracción (Ft)	Compresión paralela (F)	Compresión perpendicular (F _p)	Corte (Fv)
15	18	14	1.4	1.2

Como se observa en la **Tabla 29** la guadua es un material que por la manera en que van dispuestas sus fibras (de manera paralela al eje longitudinal del Culmo) ofrece diferentes niveles de resistencia según la dirección de carga que se aplique en relación al eje principal del material (en este caso el eje longitudinal), lo cual lo hace un material ortotrópico. Estos niveles de resistencia se deberán considerar al momento de realizar el diseño de cada elemento.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

7.1.6 SECCIONES EMPLEADAS

El diseño de estructuras en guadua rolliza obliga a la definición de secciones compuestas de acuerdo al área e inercia requerida por diseño. Para tener una mayor claridad de las secciones empleadas se ha manejado la nomenclatura indicada en la **Tabla 30**.

Tabla 30: Secciones empleadas. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Nombre	Imagen
T1	
T2	
T3	
T4	
T5	
T6	
T7	
T8	
T9	
T10	



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

T11	
T12	
T13	
T14	

A continuación, en la **Tabla 31** se describen las propiedades geométricas de las secciones empleadas.

Tabla 31: Propiedades geométricas de las secciones. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

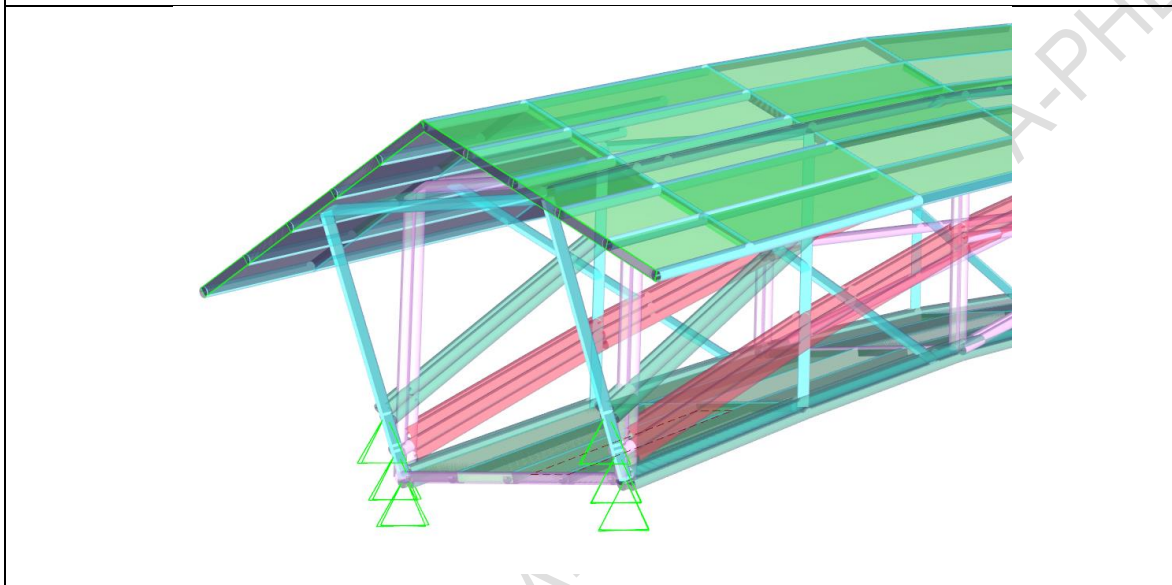
Sección	Area	I33	I22	S33	S22	R33	R22
Text	m2	m4	m4	mm3	mm3	m	m
T1	0.002827	2.898E-06	2.898E-06	0.000058	0.000058	0.032016	0.032016
T2	0.005655	5.796E-06	0.000062	0.000116	0.000416	0.032016	0.105
T3	0.01131	0.00004	0.000125	0.000399	0.000831	0.059372	0.105
T4	0.016965	0.00013	0.000187	0.00087	0.001247	0.087702	0.105
T5	0.014137	0.000048	0.000218	0.00044	0.001038	0.058523	0.124197
T6	0.005655	0.00002	5.796E-06	0.000199	0.000116	0.059372	0.032016
T7	0.008482	8.694E-06	0.000235	0.000174	0.00094	0.032016	0.166408
T8	0.031102	0.000623	0.000417	0.002405	0.001801	0.141539	0.115852
T9	0.006645	0.000212	6.368E-06	0.000944	0.000084	0.178731	0.030957
T10	0.019792	0.000133	0.000287	0.000889	0.001296	0.082093	0.120393
T11	0.016965	0.000055	0.000357	0.000472	0.001427	0.056984	0.145
T12	0.022619	0.00008	0.000589	0.000797	0.002355	0.059372	0.161323
T13	0.033929	0.000261	0.000883	0.00174	0.003532	0.087702	0.161323
T14	0.01131	0.000012	0.000294	0.000232	0.001177	0.032016	0.161323



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

A continuación, en la **Figura 33** se presentan las cargas muertas, vivas y empujes sobre la estructura, además la vista 3D típica.

Figura 33: Vista 3D sección típica. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.



7.1.7 DETERMINACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE PUENTE - SETRA

En la **Tabla 33** salida de datos, se muestra la frecuencia con la que se desplaza el puente peatonal. Al hacer el análisis de las frecuencias originadas contra las tablas de frecuencia del documento SETRA, se observa que sus valores se encuentran por encima de los rangos de las tablas de frecuencia. Es decir, el puente peatonal se clasifica en rango 4 “Despreciable el riesgo de resonancia”. Por lo tanto, el nivel de confort es óptimo y no causaría incomodidad en los peatones, no se requiere agregar o quitar algún culmo.

- **Clasificación del rango de frecuencias**

Range 1: máximo riesgo de resonancia.

Range 2: mediano riesgo de resonancia.

Range 3: Bajo riesgo de resonancia para situaciones de cargas.

Range 4: Depreciable el riesgo de resonancia.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 32: Periodos modales y frecuencias. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	1,375393	0,727065121	4,568284883	20,86922677
MODAL	Mode	2	0,685966	1,457799252	9,159622839	83,89869055
MODAL	Mode	3	0,324727	3,079514042	19,34915738	374,3898915
MODAL	Mode	4	0,282316	3,542134034	22,25588452	495,3243958
MODAL	Mode	5	0,223512	4,474039118	28,11121685	790,2405128
MODAL	Mode	6	0,221576	4,51311608	28,35674465	804,1049669
MODAL	Mode	7	0,193737	5,161649759	32,43160193	1051,808804
MODAL	Mode	8	0,169737	5,891464086	37,01716058	1370,270178
MODAL	Mode	9	0,169281	5,907342083	37,11692498	1377,66612
MODAL	Mode	10	0,154164	6,486601036	40,75651632	1661,093623
MODAL	Mode	11	0,152513	6,556815539	41,19768706	1697,249419
MODAL	Mode	12	0,149595	6,684706387	42,00124895	1764,104914
MODAL	Mode	13	0,144836	6,904362844	43,38139118	1881,9451
MODAL	Mode	14	0,123279	8,111700491	50,96731734	2597,667437
MODAL	Mode	15	0,12307	8,125445242	51,05367816	2606,478054
MODAL	Mode	16	0,120822	8,276619679	52,00353516	2704,367669
MODAL	Mode	17	0,119607	8,360718739	52,53194514	2759,60526
MODAL	Mode	18	0,117338	8,52240912	53,54787576	2867,374999
MODAL	Mode	19	0,114947	8,699666046	54,66161388	2987,892032
MODAL	Mode	20	0,114515	8,732498527	54,86790644	3010,487157
MODAL	Mode	21	0,112447	8,893057406	55,87672763	3122,208691
MODAL	Mode	22	0,110034	9,088141204	57,10247528	3260,692683
MODAL	Mode	23	0,108329	9,231159606	58,0010864	3364,126024
MODAL	Mode	24	0,107202	9,328195647	58,61078183	3435,223747
MODAL	Mode	25	0,10643	9,3958391	59,03579818	3485,225467
MODAL	Mode	26	0,101792	9,823991952	61,72596189	3810,094371
MODAL	Mode	27	0,100444	9,955813617	62,55422184	3913,03067
MODAL	Mode	28	0,098159	10,18754071	64,01020607	4097,306482
MODAL	Mode	29	0,098079	10,19590223	64,06274309	4104,035053
MODAL	Mode	30	0,097741	10,23112637	64,2840629	4132,440743
MODAL	Mode	31	0,097223	10,2856146	64,62642253	4176,574489
MODAL	Mode	32	0,095971	10,41986329	65,46993191	4286,311985
MODAL	Mode	33	0,094611	10,56954884	66,41043397	4410,34574
MODAL	Mode	34	0,094477	10,58461548	66,50510047	4422,928388
MODAL	Mode	35	0,093601	10,6836683	67,12746767	4506,096915
MODAL	Mode	36	0,092546	10,80539051	67,89227092	4609,36045
MODAL	Mode	37	0,092483	10,81281663	67,93893058	4615,698289
MODAL	Mode	38	0,090624	11,03462703	69,33260643	4807,010315
MODAL	Mode	39	0,08951	11,17189202	70,19506782	4927,347546
MODAL	Mode	40	0,089264	11,20271981	70,38876453	4954,578171
MODAL	Mode	41	0,089236	11,20619348	70,41059021	4957,651214
MODAL	Mode	42	0,088293	11,32590864	71,16278278	5064,141653
MODAL	Mode	43	0,087994	11,36442337	71,40477794	5098,642313



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

MODAL	Mode	44	0,086694	11,53486527	72,475696	5252,726511
MODAL	Mode	45	0,086295	11,58814004	72,81043124	5301,358897
MODAL	Mode	46	0,084697	11,80685204	74,18463924	5503,360699
MODAL	Mode	47	0,083675	11,95102149	75,0904826	5638,580577
MODAL	Mode	48	0,083162	12,0247054	75,55345228	5708,324151
MODAL	Mode	49	0,082527	12,11728284	76,1351335	5796,558553
MODAL	Mode	50	0,082222	12,16225491	76,41770135	5839,66508
MODAL	Mode	51	0,081883	12,21250318	76,73342054	5888,017828
MODAL	Mode	52	0,081352	12,29228236	77,23468792	5965,197018
MODAL	Mode	53	0,08125	12,30761761	77,33104214	5980,090078
MODAL	Mode	54	0,080805	12,37545402	77,75727087	6046,193173
MODAL	Mode	55	0,080533	12,41720342	78,01959007	6087,056435
MODAL	Mode	56	0,080381	12,44069336	78,16718174	6110,108301
MODAL	Mode	57	0,080278	12,45668852	78,26768228	6125,83009
MODAL	Mode	58	0,079451	12,58640298	79,08270227	6254,073798
MODAL	Mode	59	0,077722	12,86642346	80,84212285	6535,448827
MODAL	Mode	60	0,077646	12,87901823	80,92125814	6548,250019
MODAL	Mode	61	0,077515	12,90074328	81,05776066	6570,360563
MODAL	Mode	62	0,076162	13,129976	82,49807227	6805,931929
MODAL	Mode	63	0,076157	13,13082884	82,50343084	6806,816101
MODAL	Mode	64	0,075559	13,23474867	83,15637836	6914,983262
MODAL	Mode	65	0,075153	13,30611674	83,60479721	6989,762116
MODAL	Mode	66	0,074477	13,42703323	84,36453793	7117,37526
MODAL	Mode	67	0,073599	13,58708415	85,37016748	7288,065496
MODAL	Mode	68	0,073281	13,64607544	85,74082073	7351,48834
MODAL	Mode	69	0,07308	13,68361908	85,97671434	7391,995408
MODAL	Mode	70	0,072724	13,75064102	86,39782563	7464,584274
MODAL	Mode	71	0,072517	13,7898535	86,64420491	7507,218244
MODAL	Mode	72	0,071854	13,9171661	87,44413354	7646,47649
MODAL	Mode	73	0,07104	14,07656746	88,44568186	7822,638639
MODAL	Mode	74	0,070678	14,14871907	88,89902378	7903,03643
MODAL	Mode	75	0,070291	14,2265835	89,38826041	7990,2611
MODAL	Mode	76	0,069967	14,29242719	89,80196851	8064,393548
MODAL	Mode	77	0,06937	14,41551634	90,57536048	8203,895926
MODAL	Mode	78	0,068279	14,64582157	92,02241088	8468,124103
MODAL	Mode	79	0,068051	14,69489804	92,33076743	8524,970614
MODAL	Mode	80	0,06797	14,71235107	92,44042807	8545,232741
MODAL	Mode	81	0,067669	14,77778406	92,8515557	8621,411397
MODAL	Mode	82	0,067633	14,78568868	92,90122184	8630,63702
MODAL	Mode	83	0,06761	14,79064514	92,93236422	8636,42432
MODAL	Mode	84	0,067346	14,84871324	93,29721684	8704,37067
MODAL	Mode	85	0,067278	14,863594	93,39071542	8721,825726
MODAL	Mode	86	0,066334	15,07511792	94,71975943	8971,832827
MODAL	Mode	87	0,065007	15,38295826	96,6539773	9341,991328
MODAL	Mode	88	0,064056	15,61138394	98,08921821	9621,494729
MODAL	Mode	89	0,063646	15,7118521	98,72047828	9745,732832
MODAL	Mode	90	0,063463	15,75731369	99,00612187	9802,212168
MODAL	Mode	91	0,063164	15,83175772	99,47386747	9895,05031
MODAL	Mode	92	0,062747	15,93694412	100,1347731	10026,97279



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

MODAL	Mode	93	0,062486	16,0035052	100,5529887	10110,90355
MODAL	Mode	94	0,062416	16,02165703	100,6670401	10133,85296
MODAL	Mode	95	0,062358	16,03641739	100,7597821	10152,53369
MODAL	Mode	96	0,062167	16,08566965	101,0692432	10214,99192
MODAL	Mode	97	0,062102	16,10253979	101,1752414	10236,42948
MODAL	Mode	98	0,061841	16,17054723	101,6025448	10323,0771
MODAL	Mode	99	0,061487	16,26368657	102,1877565	10442,33757
MODAL	Mode	100	0,061293	16,31512146	102,5109314	10508,49106

Además, en este capítulo y para efectos de chequeo, se clasifica la densidad “d” de la multitud. Para lo anterior tiene en cuenta la clasificación II que es una mayor cantidad de personas que se puede ubicar por metro cuadrado. Ver **Tabla 33**.

Tabla 33: Clase de puente a determinar. Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal SETRA. 2006. Francia. Publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia.

Class	Density d of the crowd
III	0.5 pedestrians/m ²
II	0.8 pedestrians/m ²

Longitud del puente = 40 m

Ancho del puente (promedio) = 2.5 m

Área = $S = 100 \text{ m}^2$

$$N = S * D = 100 \text{ m}^2 * 0.8 \frac{\text{peatones}}{\text{m}^2} = 80 \text{ peatones}$$

7.2 DISEÑO DE ELEMENTOS

Para identificar los esfuerzos de diseño presentes en cada elemento, se ha elaborado en primer lugar una **Tabla 34** que agrupa los elementos según su función y geometría e indica los valores de fuerza axial, momento flector y cortante. Una vez obtenidas las fuerzas de diseño se procede con la verificación de esfuerzos para cada tipo de sollicitación de acuerdo a lo indicado en G.12.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 34: Fuerzas por tipo de elemento en kN y kN*m. Fuente: Edgar Alejandro Becerra Peñuela. 2019 modelo SAP2000.

Etiquetas de fila	Máx. de P	Mín. de P2	Máx. de V2	Mín. de V2_2	Máx. de M3	Mín. de M3
ARCO INFERIOR CENTRAL	108,454	-141,296	4,445	-4,453	2,2801	-2,758
ARCO INFERIOR EXTREMOS 1	104,277	-356,378	4,094	-4,152	3,6137	-1,3608
ARCO INFERIOR EXTREMOS 2	52,234	-329,02	6,215	-6,174	3,6671	-6,3615
ARCO INFERIOR EXTREMOS 3	54,637	-206,227	6,261	-6,288	2,7588	-6,8522
ARCO INFERIOR EXTREMOS 4	21,938	-174,783	4,384	-4,409	2,1343	-2,7378
ARCO SUPERIOR	31,009	-33,529	7,578	-7,329	5,0531	-6,7203
ARCO SUPERIOR CENTRAL	-2,657	-199,441	5,94	-6,098	2,1554	-6,5057
ARCOS DE CARGA	-6,74	-356,195	10,192	-7,777	13,4711	-13,8334
BARANDAS CENTRAL	-9,022	-87,882	0,415	-0,407	0,4217	-0,4806
BARANDAS EXTREMOS	2,121	-36,415	0,585	-0,582	0,8023	-0,8994
BARANDAS INTERMEDIO	-9,213	-66,745	0,572	-0,57	0,6286	-0,6734
CORREAS CUBIERTA	11,87	-29,699	3,124	-3,123	0,9172	-1,7526
CORREAS TABLERO INFERIOR	7,308	-26,444	12,752	-11,582	4,7699	-4,7838
CRUCETA 2C	24,419	0,055	0,076	-0,076	0,0637	-4,793E-17
CRUCETA SIMPLE	23,419	-1,675	0,04	-0,04	0,0357	-3,683E-17
CUB INCLINADA	7,369	-14,673	6,659	-6,431	4,9661	-5,6906
DIAGONALES 1C	62,208	-37,957	0,06	-0,06	0,0806	-5,487E-17
DIAGONALES 2C	16,709	-85,632	0,126	-0,126	0,1693	-2,089E-16
DIAGONALES 4C	-8,349	-219,416	0,389	-0,318	0,6569	-0,9969
DIAGONALES CUBIERTA	9,671	-16,839	0,048	-0,048	0,0512	-3,344E-17
DIAGONALES TABLERO	43,836	-55,595	0,049	-0,049	0,0548	-7,326E-17
m	0	0	0	0	0	0
PARALES DOBLES	41,794	-45,997	6,042	-6,367	5,4701	-5,4232
PARALES SIMPLES	23,309	-17,193	8,65	-13,382	3,6047	-2,9972
PIE DE AMIGO	6,045	-7,16	0,016	-0,016	0,007	-3,821E-18
TRAVESAÑO	21,283	-6,95	24,73	-24,73	20,028	-2,345E-14
TRAVESAÑO TRIPLE	8,226	-5,469	26,989	-26,999	17,9935	-5,3999
CRUCETA TRIPLE	25,97	5,513	4,256	-4,256	5,059	-5,2191

En este capítulo se realizó el análisis y diseño de todos los elementos del puente en guadua, para este ejercicio se empleó la tabla de salida de datos del software de elementos finitos SAP2000. A continuación para ilustración de este capítulo en la **Tabla 35** se muestra el análisis y diseño del elemento “Arco Inferior Extremos 1” del puente peatonal en guadua.

El análisis y diseño de los otros elementos se encuentran en el archivo de Excel adjunto. Los elementos a encontrar son los siguientes:

- Arco Inferior Extremos 1
- Arco Inferior Extremos 2



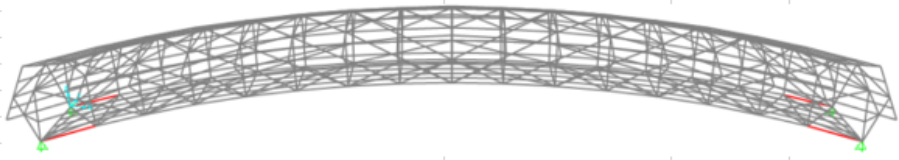
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Arco Inferior Extremos 3
- Arco Inferior Extremos 4
- Arco Inferior central
- Arco superior extremos
- Arco superior central
- Arco de carga
- Baranda
- Correas Cubierta
- Correas tablero inferior
- Cruceta simple
- Cruceta doble culmo
- Cubierta inclinada
- Diagonales simples
- Diagonales dobles
- Diagonales cuatro culmos
- Diagonales cubierta
- Diagonales tablero inferior
- Parales dobles
- Parales sencillos
- Pie de amigo
- Travesaños
- Conexión y tornillos.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA "ANGUSTIFOLIA KUNT"

Tabla 35: Cuadro de cálculo de elementos en Guadua. Fuente: Ing. Rodolfo Felizzola Contreras. 2017. Profesor de la Universidad Distrital de Colombia, Sede Bogotá.

			
1.0 ELEMENTO	ARCO INFERIOR EXTREMOS 1	Tipo de solicitación	Sección
Longitud del elemento (m)	1,17		T8
Solicitación a compresión (kN)	356,37		
Solicitación a Tensión (kN)	104,27		
Solicitación a flexión (kN * m)	3,61		
Solicitación cortante (kN)	4,15		
2.0 ELEMENTOS SOLICITADOS A COMPRESIÓN			
PROPIEDADES DEL ELEMENTO			
Numero de Culmos	11		
Diametro externo[D]	100 mm		
Diametro interno[d]	80 mm		
Espesor [t]	10 mm		
Long. no soportada lateralmente, lu	1,1700 m		
Coefficiente de long. Efectiva, k	1		
Longitud efectiva [Le]	1,17 m		
Inercia [I]	2,90E-06 m ⁴		
Inercia total [I]	6,23E-04 m ⁴		
Area neta [A]	2827,43 mm ²		
Area neta total [A]	31101,77 mm ²		
Radio de giro [r]	141,54 mm		
Esbeltez, ck	59,37		
Esbeltez [l]	8,27 col. Corta		
Modulo de seccion [s]	2405000,00 mm ³		
3.0 PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR-10)			
Sección T1	Modulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500 MPa	
	Modulo percentil 5 [E0.05]	7500 MPa	
	Modulo minimo [Emin]	4000 MPa	
Sección T2	Esf. Admisible a flexion [Fb]	15 MPa	
	Esf. Admisible a traccion [Ft]	18 MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [Fc]	14 MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4 MPa	
	Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2 MPa	
4.0 COEFICIENTES DE MODIFICACION			
Sección T3	Por duracion de carga [CD]	1	
	Por contenido de humedad [Cm]	1	
	Por temperatura [Ct]	1	
	Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1	
	Por forma [CF]	1,12	
	Por redistribucion de cargas [Cr]	1	
	Por estabilidad de columnas [Cp]	1	
Sección T4	Por cortante [Cc]	1	
5.0 Propiedades del material afectados por los coeficientes de modificación			
Sección T5	Esf. Admisible a flexion [F'b]	16,8 MPa	
	Esf. Admisible a traccion [F't]	18 MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [F'c]	14 MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4 MPa	
	Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2 MPa	
6.0 Revision por compresion axial			
Esfuerzo maximo, fc		11,46 MPa	cumple



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA "ANGUSTIFOLIA KUNT"

Sección T6	7.0 Revision por flexocompresion			
	Fuerza de compresion actuante, Na	356,3700	kN	
	Momento actuante	3,6100	kN.m	
	Esbeltez Ck	59,37	col. Corta	
	Esf. de compresion paralelo a la fibra actuante [fc]	11,46	MPa	
	Esf. de flexion actuante [fb]	1,5	MPa	
	Carga critica de euler, Ncr	33688163	N	
	Coefficiente de magnificacion de momentos [km]	1,02		
	Relacion	0,91		OK
				$\frac{f_c + k_m f_b}{F_c} \leq 1,0$
Sección T7	8 ELEMENTOS SOLICITADOS A TENSION			
	PROPIEDADES DEL ELEMENTO			
	Numero de Culmos	11,00		
	Diametro externo[D]	100,00	mm	
	Diametro interno[d]	80,00	mm	
	Espesor [t]	10,00	mm	
	Long. no soportada lateralmente, lu	1,17	m	
	Coefficiente de long. Efectiva, k	1,00		
	Longitud efectiva [Le]	1,17	m	
	Inercia [I]	2,90E-06	m4	
	Inercia total [It]	6,23E-04	m4	
	Area neta [A]	2827,43	mm2	
	Area neta total [At]	31101,77	mm2	
	Radio de giro [r]	141,54	mm	
	Esbeltez, ck	59,37		
	Esbeltez [l]	8,27	col. Corta	
	Modulo de seccion [s]	2405000,00	mm3	
	9 PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR10)			
	Modulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500	MPa	
	Modulo percentil 5 [E0.05]	7500	MPa	
	Modulo minimo [Emin]	4000	MPa	
	Esf. Admisible a flexion [Fb]	15	MPa	
	Esf. Admisible a traccion [Ft]	18	MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [Fc]	14	MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4	MPa	
	Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2	MPa	
	10 COEFICIENTES DE MODIFICACION			
	Por duracion de carga [CD]	1		
	Por contenido de humedad [Cm]	1		
	Por temperatura [Ct]	1		
	Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1		
	Por forma [CF]	1,12		
	Por redistribucion de cargas [Cr]	1		
	Por estabilidad de columnas [Cp]	0,57		
	Por cortante [Cc]	1		
	11 Propiedades del material afectados por los coeficientes			
	Esf. Admisible a flexion [F'b]	16,8	MPa	
	Esf. Admisible a traccion [F't]	18	MPa	
	Esf. Admisible a compresion paralela al eje longitudinal [F'c]	7,98	MPa	
	Esf. Admisible a compresion perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4	MPa	
	Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2	MPa	
	12 Revision por flexocompresion			
	Fuerza de tension axial aplicada, T	104,2700	kN	
	13 Revision por tension axial			
	Esfuerzo a tension actuante, ft	3,35	MPa	
				Cumple



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

7.3 VERIFICACIÓN DE DEFLEXIONES

La verificación de deflexiones se realiza siguiendo las recomendaciones establecidas en G.12.8.9.4. y de acuerdo a las combinaciones de carga establecidas en G.12.8.4. a continuación en la **Tabla 36** y **Tabla 37** se indican los puntos críticos para verificar las deflexiones y la nomenclatura empleada.

Tabla 36: Deflexiones admisibles según G.12. Fuente NSR-10.

Tabla G.12.8-2 Deflexiones admisibles δ (mm), nota3			
Condición de servicio	Cargas vivas (l/k)	Viento o Granizo (l/k)	Cargas totales (l/k) Nota 2
Elementos de techo / Cubiertas			
Cubiertas inclinadas			
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
Entrepisos			
Elementos de entepiso	l/360	-	l/240
Entrepisos rígidos	-	-	l/360
Muros exteriores			
Con acabados frágiles	-	l/240	-
Con acabados flexibles	-	l/120	-

Notas:
 1. Dependiendo del tipo de cielo raso
 2. Por evaluación de cargas totales, a largo plazo estas no deben invertir pendientes de drenaje en techos.
 3. Considerando únicamente la deflexión inicial G.12.8.9.7

Tabla 37: Combinaciones de carga para verificar deflexiones según G.12. Fuente NSR-10.

Tabla G.12.8-4 Cargas w para cálculo de sección y deflexiones		
Condición	CH $\leq$ 19% $t \leq 37^\circ\text{C}$ Clima constante	CH $\geq$ 19% $t \leq 37^\circ\text{C}$ 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



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

La **Tabla 38** verificación de deflexiones de guadua según la NSR-10, título G.12, está compuesta de las siguientes partes:

Gráfico: ilustración ubicación del nudo.

Capítulo 1, Elemento: Se describe el elemento a analizar en la deflexión “Arco inferior”. En la zona de dato se ingresa: Longitud del elemento, tipo de elemento, Condiciones de servicio, L/K admisible, deflexión admisible y se observa el grafico de la sección.

Capítulo 2, Deflexiones presentada: Se calculan conforme a la sección, deflexiones inmediatas, deflexiones diferidas. Y se hace el chequeo con la solicitud.

El análisis y diseño de las otras deflexiones se encuentran en el archivo de Excel adjunto. Los elementos a encontrar son los siguientes:

- Arco inferior
- Arco de carga
- Arco superior
- Cubierta inclinada
- Travesaño

Tabla 38: Verificación de deflexiones de guadua según la NSR-10, Título G.12

VERIFICACIÓN DE DEFLEXIONES EN GUADUA SEGÚN LA NSR-10 ,TÍTULO G.12			
1.0 ELEMENTO	Tipo de solicitud		Sección
ARCO INFERIOR			T10
Longitud elemento (m)	40		
Tipo de elemento	Entrepisos		
Condiciones de servicio	Elementos de entrepiso		
L/K admisible	L/240		
Deflexión admisible (mm)	166,67		
1.0 DEFLEXIONES PRESENTADAS	Tipo de solicitud		Revisión
Cálculo de sección 2.0D + L (mm)	85,33		Cumple
Deflexiones inmediatas D + L (mm)	58,65		Cumple
Deflexiones diferidas 2.8D + 1.3L (mm)	124,21		Cumple



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

7.4 DISEÑO DE CONEXIONES

Las conexiones se realizaron teniendo en cuenta que los tres arcos principales son elementos continuos de estribo a estribo y que mediante pernos y bastones soportan los demás elementos, tales como parales, crucetas, travesaños, barandas, etc.

El análisis y revisión de las mismas se hizo siguiendo las recomendaciones establecidas en el capítulo G.12.11 de la NSR-10, específicamente las **Tabla 39** y **Tabla 40**.

Tabla 39: Cargas admisibles para uniones emperradas según G.12. Fuente NSR-10.

Tabla G.12.11-2
Cargas admisibles para uniones emperradas con doble cizallamiento

Perno	De	P	Q	T
	(mm)	(N)	(N)	(N)
#3	80	7212	2885	2000
	90	8008	3203	2100
	100	8804	3522	2200
	110	9601	3840	2300
	115	10041	4016	2400
	120	10481	4193	2500
	125	10922	4369	2600
	130	11362	4545	2700
	135	11802	4721	2800
	140	12242	4897	2900
	150	13039	5216	3000
	80	9710	3884	2000
#4	90	9916	3966	2100
	100	10943	4377	2200
	110	11970	4788	2300
	115	12521	5009	2400
	120	13072	5229	2500
	125	13623	5449	2600
	130	14174	5670	2700
	135	14725	5890	2800
	140	15276	6110	2900
	150	16303	6521	3000
	80	11540	4616	2000
	90	12806	5122	2100
#5	100	13250	5300	2200
	110	14515	5806	2300
	115	15185	6074	2400
	120	15855	6342	2500
	125	16525	6610	2600
	130	17195	6878	2700
	135	17865	7146	2800
	140	18535	7414	2900
	150	19800	7920	3000



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

Tabla 40: Coeficiente de reducción por grupo según G.12 Fuente NSR-10.

Tabla G.12.11-3
Coeficiente de reducción por grupo C_g

Clase de unión	Numero de pernos				
	2	3	4	5	6
Uniones con elementos de guadua	1.0	0.97	0.93	0.89	0.82
Uniones con elementos de acero	1.0	0.98	0.95	0.92	0.90

La **Tabla 41** “Calculo de conexiones para elementos en guadua según la NSR-10, titulo G.12”. Está compuesta de las siguientes partes:

Capítulo 1, Elemento: Se describe la ubicación de la unión a trabajar “Arco superior y parales dobles”. En la zona de datos se ingresa: Cantidad de culmos Conexión tipo T, Cantidad de pernos, el número de calibre del perno, Cantidad de pernos en la fila, diámetro del elemento). Además, se ingresa la solicitación de fuerzas del nudo las cuales se obtienen de la tabla de salida de datos del diseño SAP2000.

Capítulo 2, Resistencia presentada: En este capítulo se hace el chequeo de cargas a cumplir con la cantidad de pernos propuestos en el nudo. Este debe suplir el valor solicitado que se referencio en el capítulo 1 “Elementos”.

El análisis y diseño de las otras conexiones se encuentran en el archivo de Excel adjunto. Los elementos a encontrar son los siguientes:

- Arcos superior y parales dobles
- Estribo
- Arco superior y para simple
- Baranda y arcos
- Arco superior y diagonal principal (pico de flauta)
- Arco de carga y parales dobles
- Arcos de carga y piso y parales dobles
- Arcos de carga y parales dobles
- Diagonales dobles y baranda.
- Arco superior y parales dobles
- Travesaño y arco inferior
- Diagonal tablero inferior y arco inferior
- Travesaño y correa
- Diagonales tablero inferior
- Diagonal y travesaño tablero inferior
- Travesaño y arco inferior
- Travesaño triple y arco inferior
- Arco superior y diagonales



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Cruceta y arco superior
- Correa cubierta
- Arco superior y parales dobles
- Cubierta y correas

Tabla 41: Cálculo de conexiones para elementos en guadua según la NSR-10, título G.12

CÁLCULO DE CONEXIONES PARA ELEMENTOS EN GUADUA SEGÚN LA NSR-10, TÍTULO G.12			
1.0	ELEMENTO	Tipo de sollicitación	
	ARCO SUPERIOR Y PARALES DOBLES		
	Cantidad de culmos (conexión tipo T)	0	
	Cantidad de pernos	8	
	#	4	
	Cantidad de pernos en fila	2	
	Diametro del elemento (mm)	100	
	Sollicitación a tensión en el perno T (kN)	0	
	Sollicitación axial paralelo a las fibras P (kN)	50,72	
	Sollicitación cortante perpendicular a las fibras Q (kN)	35	
2.0	RESISTENCIA PRESENTADA		
	Resistencia a tensión de la conexión T (kN)	0	Cumple
	Resistencia de axial paralelo a las fibras P (kN)	87,544	Cumple
	Resistencia cortante perpendicular a las fibras Q (kN)	35,016	Cumple



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo de grado del programa de Maestría de Infraestructura Vial, de la metodología para el diseño y dimensionamiento estructural de puentes peatonales en guadua, se hacen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Conforme a lo descrito en este documento se puede concluir que la guadua tiene propiedades mecánicas que corresponden a: Tracción, compresión paralela a la fibra, corte paralelo a la fibra y esfuerzos admisibles dependiendo de su característica de forma. Además, informa que por no ser un material homogéneo no se puede hablar de esfuerzo normal uniforme en los ensayos de tracción. De tal manera en la consulta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en el título G.12.7.3 manifiesta que el caso de escogencia de módulo de elasticidad a emplear dependerá del criterio del ingeniero calculista. Para el estudio de caso de este trabajo de grado, se empleó el Módulo de elasticidad promedio E0.5 de 9.500 MPa. para toda la estructura.
- De conformidad con el medio ambiente, se puede concluir que la guadua angustifolia kunth es material amigable, no provoca ningún daño o contaminación ambiental, siempre y cuando se cumpla con la Normas Técnica Colombiana No. 5301 de preservación y secado del culmo.
- Para esta metodología se recomienda a los ingenieros diseñadores y calculistas hacer cumplir las exigencias en cuanto a la obtención y comercialización de la guadua, además las disposiciones emanadas por el ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial y por la autoridad ambiental local, en especial las licencias de aprovechamiento forestal y los salvo conductos para transportar la guadua al sitio de la obra.
- Se ha creado una metodología utilizando la herramienta SAP2000, programa comercial de cálculo estructural basado en el método de los elementos finitos (MEF) con interface gráfico 3D, orientado a objetos preparado para realizar de forma totalmente integrada la modelación, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras, siendo confiable y empleado por los ingenieros calculistas. Aunque en el mercado existen otros softwares que se pueden emplear para este tipo de análisis, como: RFEM, ETABS, RM BRIDGE, LEAP y LARS BRIDGE.
- En Colombia el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NRS-10 afirma que no se puede utilizar para el cálculo de puentes y muchos menos para puentes peatonales en guadua, pero si nos aporta en el Título G.12 el método de diseño estructural de elementos utilizando guadua Angustifolia Kunth con el cual se resuelve el diseño de elementos solicitados sometidos a compresión, flexión, fuerza axial, flexo compresión y corte por el método de recomendado para la guadua como



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

es los Esfuerzos Admisibles recomendado en el Título B, De acuerdo a estos principios se puede calcular cada uno de los elementos del puente.

- También se observa en la Guía de Consideraciones Generales de Diseño otras definiciones relacionadas con el método que se consideran inconvenientes para el cálculo estructural, se concluye que es mejor realizar el cálculo del diseño de los puentes peatonales en guadua por el método de Esfuerzos Admisibles como lo recomienda el Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistentes NSR-10.
- Con la creación de la hoja de cálculo en Excel para el diseño los elementos en guadua se hace más dinámico el cálculo y el chequeo de secciones en los elementos estructurales del puente.
- Definida esta metodología para el diseño de puentes peatonales en guadua se concluye que para otros trabajos de investigación se podrá emplear otros tipos de bambúes, con diferentes diámetros, espesores, especies y propiedades físico mecánicas.
- Con la aplicación de la Guía de pasarelas y evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo cargas peatonales, publicado por los estudios de servicio técnico de rutas en las autovías de Francia (SETRA, 2006) se consigue diseñar los puentes más confort y así diseñar los puentes con mayor rigidez y evitar la flexibilidad presentada en los ya construidos puentes en Colombia como los son por nombrar algunos el puente construido en el 2001 en la Universidad Tecnología de Pereira por el constructor Jorg Stamm & la GTZ, y el puente construido en el 2003 en la ciudad de Bogotá por el arquitecto Simón Vélez.
- Se concluye, que se puede emplear como guía la Tabla A.1.3-1 de la NSR-10. La cual se tomó como referencia para la metodología o paso a paso para este estudio de caso del diseño estructural de puentes peatones en guadua angustifolia kunth. Sin embargo, dentro de este capítulo del estudio comparativo se explica cuáles pasos son que se deben desarrollar y cuales no aplica para puentes peatonales.



9. BIBLIOGRAFIA

- 1 Buitrago, Jaime. 1943. Historia de la guadua. *Hombres trasplantados*. p. 227.
- 2 Luna, P., Lozano, J., y Takeuchi, C. 2013. Guías de diseño para estructuras de Guadua Angustifolia Kunth. Guadua y su Industria. P 129 -129.
- 3 Teneche G., “Plantar guadua, semillero y vivero de guadua angustifolia, reforestar con guadua” [en línea]. disponible en: <https://guaduabambucolombia.com/2013/09/24/plantar-guadua-semillero-y-vivero-de-guadua-angustifolia-reforestar-con-guadua/> 24 septiembre 2013. [accedido: 12-sep-2017].
- 4 Hidalgo O., Manual de Construcción del Bambú. Bogotá – Colombia. Estudios Técnicos Colombianos Ltda – Editores.
- 5 Hidalgo O., 2003. Bamboo: The Gift of the Gods. Minnesota – EEUU. The Author.
- 6 Umaña C., Virginia, “Bambú Guadua en puentes peatonales”, Tecnología en Marcha, Vol. 23, N° 1, P. 29-38, enero-marzo 2010.
- 7 Ospina S., Decano de la facultad de ciencia ambientales U.T.P. Michael Tistl Asesor de proyecto U.T.P – GTZ/GOPA. “Guía para la Construcción de Puentes en Guadua”
- 8 Norma Técnica Colombiana NTC 5525. 26 septiembre 2007. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua angustifolia kunth. Bogotá, Colombia. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (INCONTEC).
- 9 Henao E. y Quintero H., “Evaluación de propiedades físico-mecánicas de *Guadua angustifolia* del Jardín Botánico de la UTP”, Recursos Naturales y Ambiente, No. 65-66: 32-37.
- 10 Journal of Bridge Engineering, Septiembre 2010, Structural Division. Publicada por American Society of Civil Engineers.
- 11 Redacción el tiempo, Bogotá ya tiene su puente de guadua, 31 diciembre 2003. Recuperado de: <https://www.eltiempo.com>



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- 12 Franco J., 8 enero 2013. Puente Peatonal de Bambú es construido por la comunidad de Davao, Filipinas. ArchDaily Colombia. Recuperado 3 Oct 2015. <http://www.archdaily.co/co/02-224355/puente-peatonal-de-bambu-es-construido-por-la-comunidad-de-davao-filipinas>
- 13 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 19 marzo 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Bogotá, Colombia.
- 14 Cadena F., Meraz L., Moreno F., y Maza F., 23 septiembre 2014. Tipos de Cercha. Recuperado de <https://es.slideshare.net/panchocadena/cerchas>
- 15 Ministerio de Transporte, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. 2013. Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP14. Bogotá, Colombia.
- 16 AASHTO LRFD GUIDE FOR THE DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGE” edición 2009.
- 17 American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. 2009. Equestrian Loads. En: LRFD Guide Specifications for the Design Bridges. P.5.
- 18 Ipv delft. vertical loads. en: brief dutch design manual for bicycle and pedestrian bridges. ver. 1.3. 2015. p. 38.
- 19 Ing. Felizzola R., 2017. Profesor de la Universidad Distrital de Colombia, Sede Bogotá.
- 20 Incontec Internacional. 2018. NTC 5407. Uniones de Estructuras con Guadua Angustifolia Kunth. Bogotá - Colombia. Incontec.
- 21 Asociación Americana de Carreteras de Estado y Funcionarios del Transporte 1914. 1997. Guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales publicado.
- 22 JF GUADUA Y BAMBÚ S. A. S. 2015. Estudio de vulnerabilidad para el puente peatonal en guadua de la UTP.
- 23 ACI Committee 318. 1972. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71). Journal Proceedings.
- 24 Umaña C., Febrero 2013. Guadua Bamboo in pedestrian bridges. Tecnología en marcha. Edición especial inglés. Pag 3-13.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- 25 Ministry of transport, tourism and sea equipment. 2006. Technical guide Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, publicado por Service d'Études techniques des routes at autoroutes SETRA. Ministerio de Transporte, Turismo y equipamiento de transporte marítimo. (Guía técnica de Pasarelas y Evaluación del comportamiento vibratorio de las pasarelas bajo carga peatonal, publicado por Estudios de servicio técnicos de rutas en las autovías de Francia “SETRA”).
- 26 American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO 2012. AASTHO LRFD Bridge Design Specifications. Estados Unidos. Publication Code: LR FDU5-6.
- 27 Stamm J., 29 abril 2009. Cartilla de puentes. *7 conceptos para diseñar puentes en bambú*. Thailand.
- 28 Barker R. y Puckett J., 25 January 2013. Design of Highway Bridges: an LRFD Approach, third edition Chapter 5. AASHTO LRFD specifications.
- 29 Laroque P., 2007. Design of a low cost bamboo footbridge. Massachusetts Institute of Technology.
- 30 Umaña C., 2016. Guadua bamboo in pedestrian bridges. Inbar Publications.
- 31 Fitrianto A., 2013. Community bridge: building resilience with bamboo. Manila Philippines.



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

ANEXOS

Verificación de las conexiones:

- Arco inferior
- Arco de carga
- Arco superior
- Cubierta inclinada
- Travesaño

Análisis y diseño de las conexiones:

- Arcos superior y parales dobles
- Estribo
- Arco superior y para simple
- Baranda y arcos
- Arco superior y diagonal principal (pico de flauta)
- Arco de carga y parales dobles
- Arcos de carga y piso y parales dobles
- Arcos de carga y parales dobles
- Diagonales dobles y baranda.
- Arco superior y parales dobles
- Travesaño y arco inferior
- Diagonal tablero inferior y arco inferior
- Travesaño y correa
- Diagonales tablero inferior
- Diagonal y travesaño tablero inferior
- Travesaño y arco inferior
- Travesaño triple y arco inferior
- Arco superior y diagonales
- Cruceta y arco superior
- Correa cubierta
- Arco superior y parales dobles
- Cubierta y correas

Análisis y diseño de los elementos:

- Arco Inferior Extremos 1
- Arco Inferior Extremos 2
- Arco Inferior Extremos 3
- Arco Inferior Extremos 4
- Arco Inferior central
- Arco superior extremos
- Arco superior central
- Arco de carga
- Baranda
- Correas Cubierta



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES PEATONALES EN GUADUA “ANGUSTIFOLIA KUNT”

- Correas tablero inferior
- Cruceta simple
- Cruceta doble culmo
- Cubierta inclinada
- Diagonales simples
- Diagonales dobles
- Diagonales cuatro culmos
- Diagonales cubierta
- Diagonales tablero inferior
- Parales dobles
- Parales sencillos
- Pie de amigo
- Travesaños
- Conexión y tornillos.

Lista de planos:

- 1 de 8 Planta estructural de piso
- 2 de 8 Planta estructural crucetas de cubierta
- 3 de 8 Planta estructural de cubierta
- 4 de 8 Alzado estructural
- 5 de 8 Corte A-Á, corte B-B´
- 6 de 8 Detalles estructurales
- 7 de 8 Detalles estructurales
- 8 de 8 Detalles estructurales