

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA PARA
PUENTES EN VIAS TERCARIAS**

**JOHN EDISON MORENO DUARTE
SERGIO ANTONIO SÁNCHEZ CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA PARA
PUENTES EN VIAS Terciarias**

**JOHN EDISON MORENO DUARTE
SERGIO ANTONIO SÁNCHEZ CÁRDENAS**

**Trabajo de Grado para optar por el título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
ingeniero civil, M. Sc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

Hacer realidad cada sueño es entender que la vida en si misma tiene sentido; porque pertenecemos a un todo y somos parte del cosmos en una delicada y compleja coexistencia, donde cada sueño y cada anhelo son un camino para entender que somos seres privilegiados por existir, por pensar y sobretodo por imaginar; la imaginación nos mantendrá siempre libres como aves en vuelo. Por eso agradezco a cada ser que ha hecho parte de mi vida, y las personas especiales que he podido encontrar en mi camino, siempre las amare.

John Edison Moreno Duarte

Primero quiero agradecer al escultor de la vida y maquinista de fe por permitirme alcanzar esta etapa al igual que mis padres Luis Antonio Sánchez y Marina Cárdenas Medina por apoyarme en cada paso, a mis familiares y amigos por estar en los mejores momentos y a Lilitiana Palacio quien fue la persona con la cual compartí las alegrías y tristezas de esta memorable experiencia de vida.

Sergio Antonio Sánchez Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por su formación a través de estos años

Al Ingeniero Oscar Javier Begambre por su orientación y colaboración en este proyecto de investigación

A los compañeros y amigos por su apoyo incondicional durante nuestra estadía en esta Universidad

CONTENIDO

INTRODUCCION	19
1. SISTEMAS ESTRUCTURALES EN PUENTES DE MADERA	21
1.1 PUENTES EN VIGA	22
1.1.1 Vigas simples de piezas circulares	22
1.1.2 Vigas compuestas de piezas circulares.	22
1.1.3 Vigas de piezas aserradas.....	22
1.1.4 Vigas compuestas de piezas aserradas.....	22
1.1.5 Vigas laminadas encoladas	23
1.2 PUENTES EN ARCO	23
1.3 PUENTES EN PÓRTICO	24
1.4 PUENTES EN PLACA.....	25
2. TABLEROS DE MADERA POSTENSADA.....	26
2.1 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE MADERA.....	27
2.1.1 Tablas de madera aserrada	27
2.1.2 Madera laminada clavada.....	27
2.1.3 Madera laminada encolada (MLC).....	27
2.1.4 Compuestos de madera y concreto.	28
3. CARGAS DE DISEÑO.....	29
3.1 CARGAS MUERTAS.....	29
3.2 CARGA VEHICULAR	29
3.3 CARGA SISMICA.....	32

4. ANALISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA	33
4.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TABLERO	33
4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS Y CLASES DE LA MADERA	33
4.2.1 Esfuerzo a flexión, F_b	35
4.2.2 Esfuerzo a tensión, F_t	35
4.2.3 Esfuerzo a compresión paralela, F_c	35
4.2.4 Esfuerzo a compresión perpendicular, F_p	36
4.2.5 Esfuerzo a cortante, F_v	36
4.3 EL ESPESOR DEL TABLERO	36
4.4 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES	39
4.4.1 Factor de modificación por contenido de humedad, K_H	40
4.4.2 Factor de modificación por duración de carga, K_D	41
4.4.3 Factor de modificación por temperatura, K_T	41
4.4.4 factor de modificación por trabajo conjunto, K_C	42
4.5 ANCHO DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA.....	43
4.6 CÁLCULO DE MOMENTOS DE DISEÑO	44
4.7 CÁLCULO DE TENSIÓN A FLEXIÓN.....	46
4.8 VERIFICACIÓN DE DEFLEXIÓN POR CARGA VIVA.....	46
4.9 VERIFICACIÓN DE APLASTAMIENTO EN LOS APOYOS BAJO LA RUEDA DEL CAMIÓN.....	47
5. DISEÑO DEL SISTEMA POSTENSADO	49
5.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE TENSADO	49
5.1.1 Momentos flectores transversales.	49
5.1.2 Corte transversal.....	51
5.1.3 Nivel de tensado requerido.	52
5.2 ESPACIAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE TENSADO	53
5.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLACA DE APOYO Y DE ANCLAJE	57

6. EJEMPLO DE DISEÑO	61
6.1 ESPECIFICACIONES DEL TABLERO	61
6.2 MATERIALES UTILIZADOS.....	61
6.3 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO DE LA MADERA	62
6.3.1 Factor de modificación por humedad, K_H	62
6.3.2 Factor de modificación por temperatura, K_T	62
6.3.3 Factor de modificación por altura, K_{hf}	62
6.3.4 Factor de modificación por duración de carga, K_D	62
6.3.5 Factor de modificación por trabajo conjunto, K_c	63
6.4 DETERMINACION DEL ANCHO DE DISTRIBUCION DE CARGA	63
6.5 MOMENTOS MÁXIMOS DE DISEÑO	64
6.5.1 Carga muerta sobre el tablero.	65
6.6 CÁLCULO DEL SISTEMA TENSADO	69
6.6.1 Determinación del nivel de tensado	69
6.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLACA DE APOYO Y ANCLAJE	71
7. CONCLUSIONES	75
8. RECOMENDACIONES.....	76
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Puente en viga.....	23
Figura 2. Puente en arco	24
Figura 3. Puente en pórtico.....	24
Figura 4. Puente en placa.....	25
Figura 5. Camiones de diseño en Colombia	30
Figura 6. Anchos de contacto.	31
Figura 7. Factor de modificación por humedad para pino radiata.....	40
Figura 8. Ancho de distribución de carga de la rueda	44
Figura 9. Ancho de distribución de carga.....	47
Figura 10. Ancho de la solera	48
Figura 11. Momento flector	50
Figura 12. Corte transversal	52
Figura 13. Espaciamiento de las barras de acero	54
Figura 14. Disminución del nivel de tensado.....	54
Figura 15. Barra de acero ASTM A722 (NTC2142).....	56
Figura 16. Placa de apoyo y anclaje.	58
Figura 17. Modelamiento del tablero.....	64
Figura 18. Cargas muertas distribuidas.	65
Figura 19. Cargas vivas en diferentes vanos.	65
Figura 20. Momentos de diseño resultantes por variación del tren de carga.....	66
Figura 21. Diagramas de cortantes, momentos y deflexiones máximas.....	67
Figura 22. Cimentación Zapata aislada.....	80
Figura 23. Cimentación Zapata corrida	80
Figura 24. Pilotes de cimentación	81
Figura 25. Muro de contención Crib Wall	82
Figura 26. Vista en planta, uniones de tope.....	92
Figura 27. Sección transversal.....	92
Figura 28. Vista lateral del tablero postensado	93
Figura 29. Placas de anclaje y de apoyo.	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Cargas muertas en KN/m ²	29
Tabla 2.Clases de resistencia de coníferas	34
Tabla 3.Clases de resistencia de dicotiledóneas	34
Tabla 4.Esfuerzos admisibles (MPa)	35
Tabla 5.Módulos de elasticidad longitudinal (MPa).....	35
Tabla 6.Espesores mínimos para tableros de madera.....	37
Tabla 7.Espesores mínimos para tableros de madera.....	38
Tabla 8.Condiciones a considerar esfuerzos admisibles	40
Tabla 9.Factor de modificación por duración de carga	41
Tabla 10.Factor de modificación por temperatura.....	41
Tabla 11.Coeficientes de afectación para esfuerzos admisibles.....	42
Tabla 12.Momentos solicitantes para tableros.....	45
Tabla 13.Factor de modificación por humedad, K _H	62
Tabla 14.Esfuerzos admisibles (MPa).	63
Tabla 15.Resultados de fuerzas internas en el tablero	73
Tabla 16.Clase de riesgo 4	90
Tabla 17.Clase de riesgo 5	91
Tabla 18.Clase de riesgo 6	91

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: ancho de contacto entre el neumático	31
Ecuación 2: ancho de contacto entre el neumático	31
Ecuación 3: carga sísmica	32
Ecuación 4: modificación de esfuerzo a flexión	39
Ecuación 5: modificación de esfuerzo a compresión	39
Ecuación 6: modificación del módulo de elasticidad	39
Ecuación 7: ancho de distribución de carga	43
Ecuación 8: ancho de distribución de carga	43
Ecuación 9: módulo de sección	46
Ecuación 10: esfuerzo a tensión por flexión	46
Ecuación 11: deflexión por carga viva	47
Ecuación 12: esfuerzo de aplastamiento en los apoyos	47
Ecuación 13: ancho de distribución de carga	48
Ecuación 14: máximo esfuerzo de aplastamiento bajo la rueda	48
Ecuación 15: momento flector para puentes de un carril	50
Ecuación 16: momento flector para puentes de dos carriles	50
Ecuación 17: esfuerzo de compresión por momento transversal	50
Ecuación 18: corte transversal	51
Ecuación 19: esfuerzo de compresión por corte transversal	51
Ecuación 20: máximo valor de esfuerzo de compresión	52
Ecuación 21: mínimo valor de esfuerzo de compresión	52
Ecuación 22: área requerida para el acero	53
Ecuación 23: cuantía del acero	55
Ecuación 24: máxima fuerza a aplicarse en la barra	55
Ecuación 25: fuerza a aplicarse en la barra	55
Ecuación 26: área mínima de la placa de apoyo	57
Ecuación 27: largo de la placa de apoyo	58
Ecuación 28: razón de los lados de placa	58
Ecuación 29: esfuerzo de trabajo de compresión	59
Ecuación 30: espesor mínimo para la placa de apoyo	59
Ecuación 31: factor K_1 para la placa de apoyo	59
Ecuación 32: espesor mínimo para la placa de anclaje	60
Ecuación 33: factor K_2 para la placa de anclaje	60

ANEXOS

ANEXO A FUNDACIONES PARA PUENTES DE MADERA	79
ANEXO B CLASIFICACION ESTRUCTURAL DE LA MADERA.....	84
ANEXO C PLANOS DEL TABLERO DE MADERA.....	92

RESUMEN

TITULO: ANALÍISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA PARA PUENTES EN VIAS Terciarias*.

AUTORES: SERGIO ANTONIO SÁNCHEZ CÁRDENAS**.
JOHN EDISON MORENO DUARTE**.

PALABRAS CLAVES: Madera laminada, Acero postensado, laminaciones, Puente de madera, tablero de madera postensada.

RESUMEN: En este documento se analiza y diseña un puente tipo de madera postensada, se explica en su contenido el comportamiento estructural de un puente cuyos materiales son la madera y acero; la forma en que combinan sus propiedades mecánicas para configurar un puente resistente, capaz de soportar las cargas vehiculares. Los capítulos contenidos en este documento dan a conocer esta tipología de puente, su uso actual y la tecnología implícita en su construcción. La idealización de este puente de madera postensada se basa en la manera en que el acero mantiene a cada pieza de madera unida mediante fricción y a su vez transfiere los esfuerzos de forma homogénea a través de las placas de apoyo y anclaje. Se explica las características físicas y mecánicas propias de cada especie de madera usada en los elementos estructurales y también se da a conocer las propiedades principales del acero de postensado; las especificaciones técnicas para su uso constructivo. Los conceptos y ecuaciones implícitos en cada capítulo están descritos de forma sencilla e inteligible siendo la compilación de información en la experiencia adquirida por países como Brasil y Chile específicamente como referentes mas cercanos.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería civil. Director: Oscar Javier Begambre.

ABSTRACT

TITLE: ANALÍISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA PARA PUENTES EN VIAS Terciarias*.

AUTHORS: SERGIO ANTONIO SÁNCHEZ CÁRDENAS**. JOHN EDISON MORENO DUARTE**.

KEYWORDS: Plywood, steel post-tensioning, laminations, wood bridge, wooden board post-tensioned.

ABSTRACT: This paper analyzes and designs a post-tensioned bridge wood type, detailed in its content the structural behavior of a bridge whose materials are wood and steel, the way they combine their mechanical properties to configure a bridge-resistant, able to withstand vehicular loads. The chapters in this document disclosed this type of bridge, its current use and the underlying technology in its construction. The idealization in this post-tensioned wooden bridge is based on the way in which the steel keeps each piece of wood joined by friction and in turn transfers the forces evenly across and support the anchoring plates. It explains the physical and mechanical characteristics of each kind of wood used in the structural elements and also disclosed the main properties of prestressing steel, the technical specifications for constructive use. The concepts and implicit equations in each chapter are described in a simple and intelligible being the collection of information on the experience of countries like Brazil and Chile specifically closest references.

*Degree work

**Physical-Mechanical Engineering faculty, Department of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre.

INTRODUCCION

La madera a través de la historia ha sido un material empleado en la construcción de diversas estructuras, pero a comienzos del siglo XIX cuando las estructuras de acero se convirtieron en las más usadas ésta fue dejada atrás; considerándose un material poco resistente y cuya vida útil era baja debido a factores biológicos y ambientales. De esta manera la madera en la ingeniería civil ha sido utilizada en procesos constructivos sin ningún uso estructural, pero a comienzos del siglo XX prestigiosas universidades de Europa (Alemania, Australia, Escocia y Noruega) retomaron la aplicación de la madera en la construcción; de igual forma, los EUA y Canadá comenzaron a realizar sus propias investigaciones (7).

Estos estudios y análisis permitieron que la madera surgiera del olvido, porque comprobaron por medio de nuevas tecnologías e ideas que ésta era en verdad tan resistente y confiable como el concreto o el acero. Un gran paso en este sentido fue la llamada **madera laminada**(13) donde las piezas de madera de pequeñas dimensiones son unidas para formar elementos de mayores tamaños, de esta manera las propiedades mecánicas de la madera incrementan sus valores. Por medio de esta tecnología las diversas formas en que se obtienen piezas de madera; sus longitudes, su flexibilidad, se han dejado atrás a las piezas de maderas únicas y poco resistentes usadas anteriormente.

Es así como desde 1970 y en cerca de 40 años (7), los avances realizados han permitido aumentar la vida útil de la madera por medio de preservantes y barnices que la protegen de insectos, hongos y de la meteorización, las maneras de configurar sus secciones le han dado un buen comportamiento mecánico (13).

En la actualidad la tecnología de madera laminada es una de las más usadas en puentes de madera, específicamente la **madera laminada encolada (MLC)** y la **madera laminada postensada**; donde la madera se combina con el acero para obtener una estructura muy resistente (12). El contenido de este trabajo se puede resumir de la siguiente manera: en los capítulos 1,2 y 3 se abordan los conceptos básicos de sistemas estructurales y tableros de madera postensada así como las cargas de diseño. Seguidamente los capítulos 4 y 5 se dedican al análisis y diseño de tableros de madera postensada; finalmente, el capítulo 6 presenta un ejemplo de diseño de tablero de madera postensada.

Las especies de madera usadas como elementos estructurales deben cumplir con normas ambientales para garantizar la reforestación de éstas; el control del impacto generado por su uso y así disponer de materia prima(1).

1.SISTEMASESTRUCTURALES EN PUENTES DE MADERA

El entendimiento del comportamiento estructural de un puente, su idealización y construcción han cambiado a través del tiempo a medida que la tecnología y los fundamentos teóricos y prácticos dentro de la ingeniería mejoran y permiten dar pasos trascendentales para la consecución de estructuras resistentes y de gran magnitud.

En puentes de madera un paso significativo desde 1970 (7) ha sido la tecnología de la **madera laminada**, donde cada pieza de madera esta constituida en esencia por piezas de menores dimensiones las cuales van unidas entre si para formar un elemento estructural mas resistente, moldeable y de tamaños superiores a las anteriores piezas de madera. Una aplicación muy usada en la construcción es la **madera laminada colada**(7), donde las piezas se unen por medio de pegamentos muy potentes que resisten los esfuerzos cortantes y deslizamientos entre piezas. Cada pieza unida es de **madera aserrada**, la cual es obtenida a partir de cada especie de madera y clasificada según su resistencia.

La tipología en los puentes se clasifican principalmente por:

- 1) El uso del puente: carretera, ferrocarril, canal o acueductos
- 2) Material estructural: roca, madera, metálicos, concreto reforzado o mixtos
- 3) Transferencia de cargas: arco, vigas, pórtico, colgantes y atirantados

Los puentes de madera siguen de manera general la forma estructural para puentes de concreto o acero; siendo la madera un material resistente y liviano a partir de ella se obtienen puentes confiables y de rápido proceso constructivo. A continuación se presentan los tipos de puentes en madera.

1.1 PUENTES EN VIGA

Los puentes en viga son los más comunes, donde las vigas son utilizadas para resistir las cargas que actúan sobre el puente y son básicamente elementos longitudinales cuya sección transversal varia de acuerdo a la solitud de cargas, clase de madera y longitud requerida (1). Los tipos de viga en puentes de madera son:

1.1.1 Vigas simples de piezas circulares. Vigas puestas en sentido longitudinal donde los elementos que actúan como vigas tienen sección transversal circular, cuyo diámetro usual es de 70 cm y de eucalipto.

1.1.2 Vigas compuestas de piezas circulares. Vigas de sección transversal dispuestas unas sobre otras y fijadas mediante pernos.

1.1.3 Vigas de piezas aserradas. Piezas macizas aserradas donde los vanos no sobrepasan los 4m, forma una estructura resistente donde el puente esta apoyado simplemente sobre pilares separados cada 3m o 4m.

1.1.4 Vigas compuestas de piezas aserradas. Esta estructura es similar en su forma a la anterior, donde su área transversal está formada por secciones unidas para aumentar su rigidez y resistencia.

1.1.5 Vigas laminadas encoladas. Estas vigas pueden tener cualquier sección y son objeto de estudio en varios países, debido a su rigidez y resistencia puede utilizarse en puentes con longitudes superiores a 20 m.

Figura1. Puente en viga



Fuente: Hool G. A. eds., Movable and LongSpan Bridges(6).

1.2 PUENTES EN ARCO

Las estructuras en arco son muy usadas en puentes debido a su capacidad de transferir los esfuerzos de compresión a través de sus elementos, son muy resistentes; en puentes hasta de 30 m de luces (1). Pueden ser de arco superior o arco inferior.

Figura 2. Puente en arco

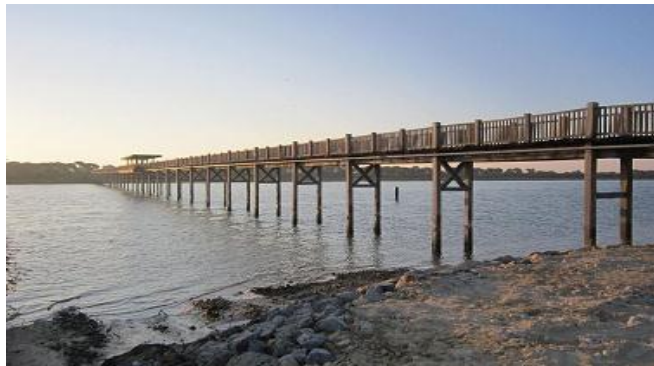


Fuente: Hool G. A. eds., Movable and Long Span Bridges(6)

1.3 PUENTES EN PÓRTICO

Este tipo de puente es interesante debido a que distribuye las cargas de manera más homogénea, haciendo de este tipo de estructura una configuración resistente, sin embargo; es para puentes de luces intermedias menores de 30 m debido a la baja resistencia en los apoyos los cuales se diseñan con especial cuidado (1).

Figura 3. Puente en pórtico



Fuente: Hool G. A. eds., Movable and Long Span Bridges(6).

1.4 PUENTES EN PLACA

De manera simplificada este sistema estructural se denomina como tablero¹, contiene elementos como vigas longitudinales y transversales los cuales soportan las cargas solicitantes y las transmiten a los demás elementos que conforman la superestructura e infraestructura (1). Los tableros son de madera laminada y pueden ser de: placa laminada encolada, placa laminada apernada, placa laminada atornillada, placa compuesta de concreto y madera aserrada.

Figura 4. Puente en placa



Fuente: Hool G. A. eds., Movable and Long Span Bridges(6).

Los sistemas estructurales descritos anteriormente han mejorado con los avances tecnológicos, los puentes de madera han sido llevados a otro nivel dentro de la ingeniería civil y en la actualidad países como Noruega, Australia, los EUA, Brasil, Argentina y Chile realizan investigaciones y avances en esta materia.

¹ El tablero es la parte de la superestructura del puente donde esta la capa de rodado.

2. TABLEROS DE MADERA POSTENSADA

Este sistema de tablero es tema de estudio en muchos países, debido a la calidad de la estructura obtenida a partir de él (2); la manera en que resiste las cargas, transferencia de esfuerzos y deformaciones pequeñas.

Los tableros de madera postensada son piezas de madera aserrada cepillada unidas entre sí de manera paralela por medio de elementos de acero. La madera es un material anisotrópico² y combinada con el acero mejora esa condición; permitiendo así un excelente comportamiento estructural de la madera donde cada pieza ensamblada aporta su propia resistencia; las cargas y esfuerzos a soportar se transfieren a través de ellas por medio de fricción.

El acero es el alma de este tipo de tablero, permitiendo que el conjunto de elementos aserrados formen una laminación cuyo comportamiento es el de una placa maciza y de alta resistencia.

Las piezas aserradas son de 4 cm a 5 cm de ancho, cuya altura varia de 20 cm a 40 cm y su largo de 4m a 6 m. El acero de alta resistencia varía con diámetros de 15 mm a 32 mm (1).

En los siguientes capítulos se explica de manera analítica y matemática los tableros de madera postensada.

² Anisotropía es la variaron en la densidad de la madera. en sus tres direcciones: axial, tangencial y radial.

2.1 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE MADERA

Los materiales para construcción de tableros son los tipos de piezas de madera generalmente usados para este propósito tales como:

2.1.1 Tablas de madera aserrada. Son elementos fijados sobre las vigas principales en dirección transversal, sus espesores varían de 6 cm a 16 cm y el ancho entre 25 cm y 30 cm (1). Son utilizados en puentes de vanos pequeños.

2.1.2 Madera laminada clavada. La madera laminada es construida con piezas aserradas de 6 cm de espesor y de 12 a 30 cm de altura (1). Las láminas se disponen y se fijan sobre las vigas principales con la mayor dimensión en sentido vertical. Este tipo de tablero fue muy utilizado por los EUA y Canadá entre 1920 y 1960 (12).

2.1.3 Madera laminada encolada (MLC). Son tableros construidos con paneles de dimensiones que pueden variar de 10 cm a 20 cm de espesor³ y entre 100 cm a 150 cm de largo. Son muy resistentes y rígidos debido a la homogeneidad entre láminas, son usados en dirección longitudinal o transversal, apoyados en vigas de madera encolada o vigas metálicas (1). Este desarrollo se logró en 1970 en Madison⁴ Estados Unidos y son los más utilizados.

³ El espesor del tablero es la dimensión en sentido vertical.

⁴ Desarrollo de MLC en forestproductslaboratory (FDL).

2.1.4 Compuestos de madera y concreto. Los elementos de madera se conectan con los de concreto conformando una estructura monolítica donde el concreto resiste esfuerzos a compresión y la madera esfuerzos a tracción (1). Hay dos tipos: tableros en vigas T y tableros en bloque.

3. CARGAS DE DISEÑO

En este capítulo se explica las cargas para el análisis y diseño de tableros de madera postensada, puesto que es fundamental conocerlas para comprender los efectos generados en el puente y en el tablero.

3.1 CARGAS MUERTAS

Las cargas muertas son el peso de los elementos estructurales y no estructurales que conforman el tablero de madera postensada. En la tabla 1 se muestran valores referentes a los componentes del tablero.

Tabla 1. Cargas muertas en KN/m²

carpeta de rodado asfaltico	1,85
2 sistemas de baranda - guardarruedas	0,47
2 pasillos	0,14
madera tipo pino	1,73






Fuente: Diseño de un tablero postensado (2).

3.2 CARGA VEHICULAR

Esta carga corresponde a la carga móvil generada por el camión de diseño. En el diseño de tableros de madera postensada los vehículos son HS 15-44, H 15-44, HS 20-44, H 20-44 según la AASHTO; los camiones equivalentes para Colombia

son los tipo C_2 Y C_2-S_1 . En la figura 5 se presentan los camiones de diseño y los pesos por eje.

Figura 5. Camiones de diseño en Colombia

Tipo	Descripción general	Configuración esquemática del vehículo	Peso máximo (kN)			
			Total	Poreje		
2	Camión, dos ejes simples, seis llantas.		166,77	58,86	107,91	0,00
4	Camión, dos ejes simples, un eje tándem, doce llantas.		333,54	117,72	215,82	0,00
2S1	Tracto-camión con semirremolque, tres ejes simples, diez llantas.		264,87	49,05	107,91	107,91
2S2	Tracto-camión con semirremolque, dos ejes simples, un eje tándem, catorce llantas.		313,92	49,05	98,10	166,77
3S2	Tracto-camión con semirremolque, un eje simple, dos ejes tándem, dieciocho llantas.		470,88	49,05	210,92	210,92

Fuente: Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño (16).

De la figura 5, se toma como referencia los pesos máximos por eje de los camiones tipo C_2 y tipo C_2-S_1 .

El ancho de contacto entre el neumático y la superficie en la dirección transversal y longitudinal, se calculan con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, ver figura 6.

$$b = \sqrt{0,00363 \cdot P}$$

Ecuación 1: ancho de contacto entre el neumático en dirección transversal.

$$a = \frac{\sqrt{0,00363 \cdot P}}{2,5}$$

Ecuación 2: ancho de contacto entre el neumático en dirección longitudinal.

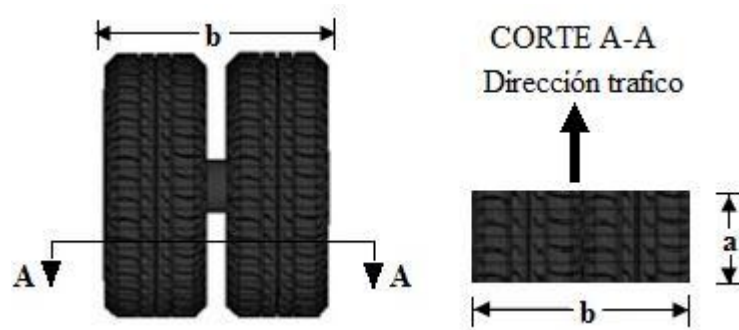
Dónde:

a= ancho de contacto entre el neumático y la dirección longitudinal de la superficie

b= ancho de contacto entre el neumático y la dirección transversal de la superficie

P= carga máxima de la rueda (kN)

Figura 6. Anchos de contacto.



Fuente. Tablero de puentes de madera postensada (12)

Con el objetivo de considerar la variabilidad de las cargas de los camiones, se suma un factor del 20%, por sobreuso en la carga viva del camión de diseño.

3.3 CARGA SISMICA

Esta carga se calcula según lo establecido en la norma colombiana sismo resistente (NSR-10) en el capítulo A, donde dicha carga depende en esencia de los siguientes factores:

- 1) valor de aceleración efectiva máxima del suelo, A_0
- 2) coeficiente del suelo, S
- 3) coeficiente de importancia, K .

El valor de la carga sísmica se determina por medio de la ecuación 3.

$$C_S = R \cdot R_h \cdot S \cdot P_p$$

Ecuación 3: carga sísmica

Dónde:

C_S = carga sísmica

R = factor de reducción por efecto de carga eventual

P_p = peso propio del tablero

Las cargas sísmicas y de viento son tenidas en cuenta en el modelamiento general del puente; para el diseño del tablero de madera postensada estos efectos están implícitos en las ecuaciones semi-empíricas, por medio de factores obtenidos con mediciones tomadas en diferentes puentes a través de sus años de funcionamiento.

4. ANALISIS Y DISEÑO DE TABLEROS DE MADERA POSTENSADA

Un tablero de madera postensada consiste en una estructura que combina las propiedades mecánicas de la madera y el acero, para formar así una estructura resistente y cuyo comportamiento estructural depende de la forma en como se configure; a continuación se describen los conceptos y parámetros para su análisis y diseño⁵.

4.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TABLERO

Las laminaciones de madera que conforman el tablero van unidas a otras mediante barras de acero, las cuales las atraviesan y permite que cada elemento de madera genere fricción con el siguiente y así forman una placa que se comporta como **maciza** y de manera **ortotrópica**. El comportamiento ortotrópico de un material es la relación que existe en el módulo de elasticidad respecto de sus ejes.

4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS Y CLASES DE LA MADERA

La resistencia en la madera esta determinada por los esfuerzos admisibles propios de cada especie, la clase de la madera se clasifica de acuerdo a dos grandes grupos de maderas **coníferas** y maderas **dicotiledóneas** respecto de su resistencia a la compresión.

⁵ Las ecuaciones tratadas en este capítulo son compilación de manuales de diseño brasileros y chilenos

Se denominan maderas coníferas y dicotiledóneas por su estructura celular, la cual refleja su aspecto externo y resistencia mecánica; se diferencian en que las dicotiledóneas presentan mayores radios que las coníferas.

Las siguientes tablas muestran la clasificación de la madera de acuerdo a sus propiedades mecánicas.

Tabla 2. Clases de resistencia de coníferas

CONIFERAS				
clase	Fc (MPa)	Fv (MPa)	E (MPa)	ρ (Kg/m ³)
C 20	20	4	3500	400
C 25	25	5	8500	450
C 30	30	6	14500	500

Manual de proyecto y construcción de puentes de madera (1).

Tabla 3. Clases de resistencia de dicotiledóneas

DICOTILEDONEAS				
clase	Fc (MPa)	Fv (MPa)	E (MPa)	ρ (Kg/m ³)
C 20	20	4	9500	500
C30	30	5	14500	650
C40	40	6	19500	750
C50	50	7	22000	770
C60	60	8	24500	800

Manual de proyecto y construcción de puentes de madera (1).

En las tablas 2 y 3 desde ES1 hasta ES6 se refiere a la clasificación en la madera de acuerdo a su resistencia y módulo de elasticidad; los cuales se organizan en orden descendente para elementos de madera aserrada en general.

Tabla 4. Esfuerzos admisibles (MPa)

GRUPO	F_b Flexión	F_t Tensión	F_c Compresión \parallel	F_p Compresión \perp	F_v Cortante
ES1	29.5	21.0	23.0	6.0	2.0
ES2	28.5	20.0	22.0	4.3	2.0
ES3	23.0	17.0	19.0	3.8	1.6
ES4	17.0	12.0	15.0	2.8	1.5
ES5	15.0	11.0	13.0	2.0	1.1
ES6	12.5	9.0	10.0	1.5	1.3

Fuente: tabla G2.2-1, NSR-10 Capítulo G.2 (11).

Tabla 5. Módulos de elasticidad longitudinal (MPa)

GRUPO	Módulo Promedio $E_{0.5}$	Módulo 5° Percentil $E_{0.05}$	Módulo Mínimo E_{min}
ES1	18 000	13 250	7130
ES2	18 000	13 250	7130
ES3	14 000	11 000	5500
ES4	12 500	10 000	5000
ES5	11200	8250	4435
ES6	9000	6500	3564

Fuente: tabla G2.2-2, NSR-10 Capítulo G.2 (11).

4.2.1 Esfuerzo a flexión, F_b . Esfuerzos a tracción y compresión ejercidos en la sección transversal de el elemento de madera, ver columna 2 de la tabla 4.

4.2.2 Esfuerzo a tensión, F_t . Resistencia de la madera en dirección axial de sus fibras, ver columna 3 de la tabla 4.

4.2.3 Esfuerzo a compresión paralela, F_c . Resistencia de la madera en dirección paralela a las fibras, ver columna 4 de la tabla 4.

4.2.4 Esfuerzo a compresión perpendicular, F_p . Resistencia en sentido perpendicular a las fibras, ver columna 5 de la tabla 4.

4.2.5 Esfuerzo a cortante, F_v . Capacidad de la madera para resistir cortes en su sección transversal bajo la acción de cargas, ver columna 6 de la tabla 4.

4.3 EL ESPESOR DEL TABLERO

Es la dimensión vertical del tablero la cual varía de acuerdo a las cargas solicitantes y las luces del puente; para puentes menores a 4 m la norma chilena NCh 174 de 1985 propone espesores mínimos de 22 cm (10); mientras que la norma brasilera estima espesores mínimos de 25 cm. Podemos obtener valores a partir de ábacos del método de diseño AASHTO 1991 mostrados en la Tabla 6 y Tabla 7.

Los siguientes parámetros se tienen en cuenta para el uso de los ábacos:

- 1) criterio de diseño por carga del vehículo⁶.
- 2) luz de cálculo, medido desde el centro de los apoyos.
- 3) límite de deflexión por carga viva.

Para usar el ábaco se entra en la tabla y se toma un espesor para el tablero conociendo la especie de la madera y cargas de diseño (2).

⁶ Camiones tipo INVIAS adaptados a partir de la AASHTO.

Tabla 6. Espesores mínimos para tableros de madera postensada para HS 20-44.

Longitud del puente (m)	Luz de cálculo (m)	Valores de diseño requeridos	Carga de diseño HS20-44								
			Mínimos valores requeridos de F' (T/m ²) y E' ($\times 10^6$ T/m ²) para los espesores de tablero dados (mm)								
			200	220	225	245	250	270	275	295	300
3,5	3	F'	1263	1004	951	774	737	610	584	491	471
		E' para L/360	0,94	0,67	0,62	0,46	0,43	0,33	0,31	0,24	0,23
		E' para L/500	1,30	0,94	0,87	0,64	0,60	0,46	0,43	0,34	0,32
4	3,5	F'	1486	1183	1120	912	868	720	689	580	557
		E' para L/360	1,27	0,92	0,85	0,63	0,59	0,45	0,42	0,33	0,31
		E' para L/500	1,77	1,27	1,18	0,88	0,82	0,62	0,58	0,46	0,43
4,5	4	F'	1713	1364	1293	1053	1003	832	796	671	644
		E' para L/360	1,66	1,20	1,11	0,82	0,77	0,59	0,55	0,43	0,40
		E' para L/500		1,66	1,54	1,14	1,07	0,81	0,76	0,60	0,56
5	4,5	F'		1549	1468	1197	1140	947	906	764	734
		E' para L/360		1,52	1,40	1,04	0,97	0,74	0,70	0,54	0,51
		E' para L/500				1,45	1,35	1,03	0,97	0,75	0,71
5,5	5	F'			1646	1343	1280	1064	1018	859	825
		E' para L/360			1,73	1,29	1,20	0,92	0,86	0,67	0,63
		E' para L/500				1,79	1,67	1,27	1,19	0,93	0,88
6	5,5	F'				1492	1422	1183	1132	956	918
		E' para L/360				1,56	1,45	1,11	1,04	0,81	0,76
		E' para L/500						1,54	1,44	1,13	1,06
6,5	6	F'					1567	1304	1248	1055	1014
		E' para L/360					1,73	1,32	1,24	0,97	0,91
		E' para L/500						1,83	1,72	1,34	1,26
7	6,5	F'						1428	1367	1156	1111
		E' para L/360						1,55	1,45	1,13	1,07
		E' para L/500								1,57	1,48

Fuente: Método de diseño ASSHTO 2002, puentes de madera (8).

Tabla 7. Espesores mínimos para tableros de madera postensada para HS 15-44.

Longitud del puente (m)	Luz de cálculo (m)	Valores de diseño requeridos	Carga de diseño HS15-44								
			Mínimos valores requeridos de F' (T/m ²) y E' ($\times 10^6$ T/m ²) para los espesores de tablero dados (mm)								
			200	220	225	245	250	270	275	295	300
3,5	3	F'	964	767	727	592	564	468	448	378	362
		E' para L/360	0,70	0,51	0,47	0,35	0,32	0,25	0,23	0,18	0,17
		E' para L/500	0,98	0,70	0,65	0,48	0,45	0,34	0,32	0,25	0,24
4	3,5	F'	1137	906	859	700	667	554	530	448	430
		E' para L/360	0,96	0,69	0,64	0,47	0,44	0,34	0,32	0,25	0,23
		E' para L/500	1,33	0,96	0,88	0,66	0,61	0,47	0,44	0,34	0,32
4,5	4	F'	1314	1048	994	811	773	643	615	520	499
		E' para L/360	1,25	0,90	0,83	0,62	0,58	0,44	0,41	0,32	0,30
		E' para L/500	1,73	1,25	1,15	0,86	0,80	0,61	0,57	0,45	0,42
5	4,5	F'	1495	1194	1132	925	881	734	702	594	570
		E' para L/360	1,58	1,14	1,05	0,78	0,73	0,56	0,52	0,41	0,38
		E' para L/500		1,58	1,46	1,09	1,01	0,77	0,72	0,57	0,53
5,5	5	F'		1342	1273	1041	992	827	791	670	643
		E' para L/360		1,40	1,30	0,97	0,90	0,69	0,64	0,50	0,47
		E' para L/500			1,80	1,34	1,25	0,95	0,89	0,70	0,66
6	5,5	F'		1494	1417	1160	1106	922	883	748	719
		E' para L/360		1,70	1,57	1,17	1,09	0,83	0,78	0,61	0,57
		E' para L/500				1,62	1,51	1,15	1,08	0,84	0,80
6,5	6	F'				1281	1222	1020	977	828	796
		E' para L/360				1,39	1,30	0,99	0,93	0,72	0,68
		E' para L/500					1,80	1,37	1,29	1,01	0,95
7	6,5	F'				1405	1340	1120	1073	910	875
		E' para L/360				1,63	1,52	1,16	1,09	0,85	0,80
		E' para L/500						1,61	1,51	1,18	1,11

Fuente: Método de diseño ASSHTO 2002, puentes de madera (8).

4.4 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO PARA LAS LAMINACIONES

Cuando se seleccione la clase y especie de la madera deberá modificarse sus propiedades mecánicas mediante unos factores debido a cambios de humedad, temperatura, duración de las cargas por medio de las ecuaciones 4, 5 y 6

$$F'_f = F_f \cdot K_H \cdot K_{hfl} \cdot K_T \cdot K_D \cdot K_C$$

Ecuación 4: modificación de esfuerzo a flexión

$$F'_{cn} = F_{cn} \cdot K_H \cdot K_T$$

Ecuación 5: modificación de esfuerzo a compresión

$$E'_f = E_f \cdot K_H \cdot K_T$$

Ecuación 6: modificación del módulo de elasticidad

Dónde:

F'_f = esfuerzo de flexión de diseño

F_f = esfuerzo de flexión

F'_{cn} = esfuerzo de compresión de diseño

F_{cn} = esfuerzo de compresión

E'_f = módulo de elasticidad de diseño

K_H = factor de modificación por humedad

K_{hfl} = factor de modificación por altura

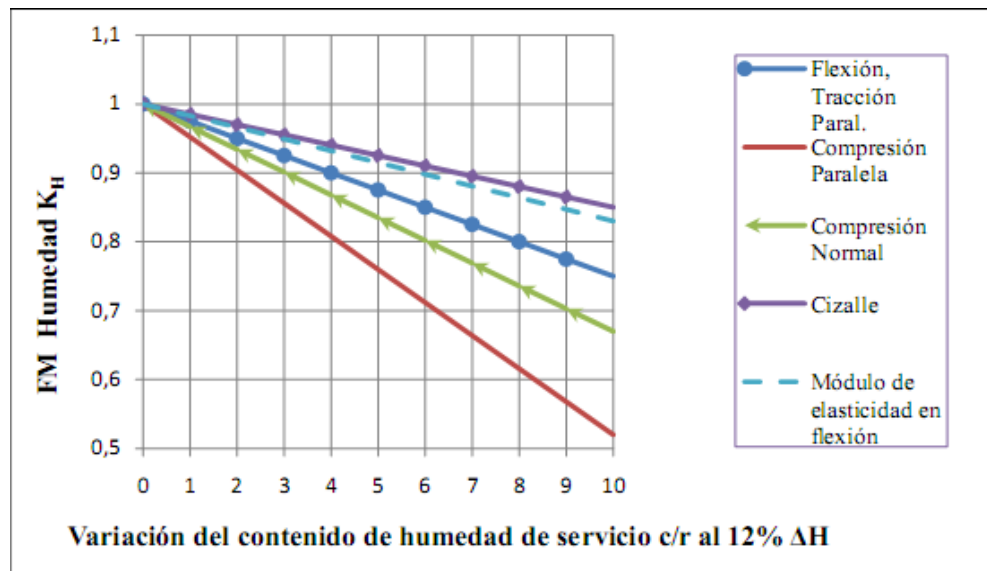
K_T = factor de modificación por temperatura

K_D = factor de modificación por duración de la carga

K_C = factor de modificación por trabajo en conjunto

4.4.1 Factor de modificación por contenido de humedad, K_H .Aplicable a esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad en piezas de madera aserrada con espesores de 100 mm como mínimo y una humedad de entre 12% y 20%, en la figura 7 se muestra este factor para pino radiata. En la Tabla 8 se presentan las variaciones de esfuerzos y módulos de elasticidad durante la etapa de construcción y servicio.

Figura 7. Factor de modificación por humedad para pino radiata



Fuente: tomada de la sección 6.12 en la NCh1198 of. de 2006 (10).

Tabla 8. Condiciones a considerar esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad

Durante la construcción	En servicio	Esfuerzos admisibles	Módulos de elasticidad
CHc > 19% *CH c > 19% CH c ≤ 12% CH c ≤ 12%	CHs > 19% *CH s ≤ 12% CH s ≤ 12% CH s > 19%	CH > 19% *CH = 12% CH = 12% CH > 19%	CH > 19% *CH = 12% CH = 12% CH = 12%

Fuente: tabla G 2.2 -4, título G NSR-10 (11).

4.4.2 Factor de modificación por duración de carga, K_D . Este factor de modificación esta relacionado con las cargas vivas; en el esfuerzo de diseño a flexión, para pino radiata este factor es de 1,15⁷. En la Tabla 9 se dan a conocer factores de modificación por duración de carga.

Tabla 9. Factor de modificación por duración de carga

Duración carga	Flexión F_b	Tensión F_t	Compresión F_c	Compresión [⊥] F_p	Cortante F_v	Típica carga de diseño
Permanente	0.90	0.90	0.90	1.00	0.90	muerta
Diez años	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	viva de ocupación
Dos meses	1.15	1.15	1.15	1.00	1.15	
7 días	1.25	1.25	1.25	1.00	1.25	construcción
Diez minutos	1.60	1.60	1.60	1.00	1.60	viento y terremoto
Impacto	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	Impacto

Fuente: tabla G 2.2 -3, título G NSR-10 (11).

4.4.3 Factor de modificación por temperatura, K_T . Factor para modificar la variación de resistencia de la madera por temperatura, los valores se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Factor de modificación por temperatura

Parámetros de diseño	Condiciones de servicio	$^{\circ}C_t$		
		$T \leq 37.8^{\circ}C$	$37.8^{\circ}C < T \leq 51.7^{\circ}C$	$51.7^{\circ}C < T \leq 65^{\circ}C$
$F_t, E_{0.5}, E_{0.05}, E_{min}$	Húmedo o seco	1.	0.9	0.
$F_b, F_v, F_c, F_{c\perp}$	Seco	1.	0.8	0.
	Húmedo	1.	0.7	0.

Fuente: tabla G 2.2 -6, título G NSR-10 (11).

⁷ Según la NCh 1198 of. 2006 sección 6.1.2

4.4.4 factor de modificación por trabajo conjunto, K_c . Este factor depende de la clase estructural de la madera y modifica el esfuerzo admisible a flexión, para pino radiata de clase C24 es de 1,3⁸.

En la Tabla 11 se presentan los coeficientes de afectación para esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para piezas aserradas.

Tabla 11. Coeficientes de afectación para esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad

Esfuerzos		CH ≤ 12%	CH > 19%
Flexión	F_b	1.0	0.80
Tensión	F_t F_c	1.0	0.80
Compresión Paralela	F_p	1.0	0.75
Compresión perpendicular	F_v	1.0	0.60
Cortante			
Módulos de elasticidad	$E_{0.5}$	1.0	0.85
	$E_{0.05}$	1.0	0.85
	E_{min}	1.0	0.85
		1.0	0.85

Fuente: tabla G 2.2 -5, título G NSR-10(11).

El comportamiento mecánico de la madera varía según las condiciones donde se encuentre; temperatura y humedad son factores considerados con especial cuidado para diseño de elementos laminados de madera en uso estructural.

Las tablas presentadas anteriormente 8,9 y 11 han sido actualizadas de la norma NSR-98; y la tabla 10 ha sido incluida en la NSR-10.

⁸ Según la NCh 1198 of. 2006 sección 6.1.2

4.5 ANCHO DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA

El ancho de distribución de carga es la dimensión donde es transferida la carga del camión de diseño en su apoyo inmediato, la solera. Se escoge el menor valor de las ecuaciones 7 y 8⁹.

$$D = 1,3(b + t)$$

Ecuación 7: ancho de distribución de carga

$$D = \frac{Bt}{2}$$

Ecuación 8: ancho de distribución de carga

Dónde:

b= ancho de contacto entre el neumático y la dirección transversal de la superficie

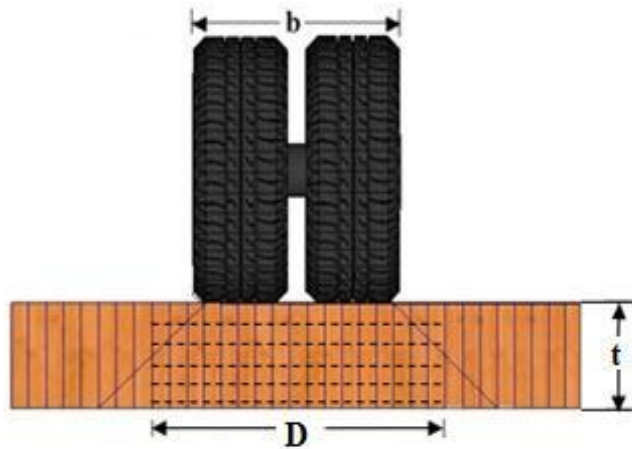
t= espesor de el tablero

Bt= ancho transversal entre ejes del camión de diseño

Las ecuaciones expuestas durante este capítulo fueron obtenidas a partir de la experiencia en el diseño y construcción de puentes tanto en Brasil como en Chile apoyadas fundamentalmente en los estudios compilados en la norma AASHTO.

⁹ Ecuaciones de diseño, fuente de la normatividad chilena NCh y normatividad brasilera apoyadas en la AASHTO.

Figura 8. Ancho de distribución de carga de la rueda



Fuente: diseño de un tablero de madera postensada (2).

4.6 CÁLCULO DE MOMENTOS DE DISEÑO

La resistencia del tablero está determinada a partir de los momentos máximos tanto positivo como negativo que actúan sobre él, los cuales dependen de la posición más crítica del camión de diseño sobre el tablero.

Los momentos sobre el tablero dependen de la magnitud de la carga, luz y ancho del tablero, las rigideces longitudinal y transversal.

De acuerdo a las especificaciones contenidas en la norma AASHTO y a investigaciones en Chile; la tabla 12 muestra valores de momentos solicitantes para las siguientes condiciones:

- 1) Carga del camión
- 2) esfuerzos y módulo de elasticidad de diseño
- 3) longitudes de luces y vanos
- 4) dimensiones del tablero

Tabla 12. Momentos solicitantes para tableros de 23 cm de espesor y de diferentes longitudes

Luz total	N° vanos	Disposición de vanos	M _{solicitante} (kN-m)
20	6	3,25-3,25-3,5-3,5-3,25-3,25	61,88
19	6	3-3,25-3,25-3,25-3,25-3	57,369
18	5	3,25-3,75-4-3,75-3,25	63,351
17	5	3,25-3,5-3,5-3,5-3,25	62,174
16	5	3-3,25-3,5-3,25-3	57,565
15	5	3-3-3-3-3	56,878
14	4	3-4-4-3	61,782
13	4	3,25-3,25-3,25-3,25	61,586
12	4	3-3-3-3	56,878
11	4	2,75-2,75-2,75-2,75	51,779
10	3	3,25-3,5-3,25	62,469
9	3	3-3	57,369
8	3	2,5-3-3,5	47,464
7	2	3,5-3,5	64,626
6	2	3-3	55,015
5	2	2,5-2,5	45,405
4	2	2-2	35,696

Fuente: manual de diseño de un puente de madera (14).

Las tablas mostradas en este capítulo son obtenidas a partir de investigación y medición en puentes reales bajo cargas de diseño las cuales varían de acuerdo a la experiencia adquirida por Brasil¹⁰, Chile¹¹ y los EUA, a través de su tecnología y alcances en el análisis y diseño de puentes de madera postensada.

¹⁰ Norma NBR 7190 para estructuras en madera de 1997

¹¹ Norma NCh174 NCh 1198 Sección 6.12. 1985. 2001. 2006

4.7 CÁLCULO DE TENSIÓN FLEXIÓN

El esfuerzo a tensión por flexión se determina para el momento máximo debido a cargas vivas y muertas de acuerdo a las ecuaciones 9 y 10.

$$W = \frac{(C_{bj} \cdot D) \cdot t^2}{6}$$

Ecuación 9: módulo de sección

$$F_f^T = \frac{M_{\text{máx}}}{W} \leq F'f$$

Ecuación 10: esfuerzo a tensión por flexión

Dónde:

W= Módulo de sección

F_f^T= esfuerzo a tensión por flexión

t= espesor del tablero

D= ancho de distribución de la carga

C_{bj}= factor de modificación por uniones de tope¹²

4.8 VERIFICACIÓN DE DEFLEXIÓN POR CARGA VIVA

La deflexión máxima para vías con bajo volumen de tráfico esta definida por la ecuación 11¹³.

¹² un valor conservador para este factor es de 0,8 de acuerdo NCh174 NCh 1198

¹³ Ecuaciones analizadas a partir de la NCh 1198 of.06 sección 7.5.3

$$\Delta_{\text{máx}} \leq \frac{L}{360}$$

Ecuación 11: deflexión por carga viva

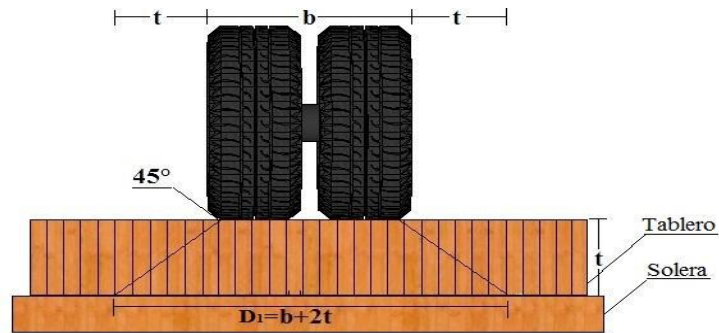
Dónde:

L= largo del vano

$\Delta_{\text{máx}}$ = deflexión por carga viva

4.9 VERIFICACIÓN DE APLASTAMIENTO EN LOS APOYOS BAJO LA RUEDA DEL CAMIÓN

Figura 9. Ancho de distribución de carga



Fuente: manual de diseño de un puente de madera (14).

El esfuerzo a compresión de diseño modificado por el factor K_{cn} ; debe ser mayor al esfuerzo de aplastamiento definido en la ecuación 12.

$$F_{cn}^{Ta} = \frac{R_{\text{máx}}}{D1 \cdot l_s} \leq F'_{cn} \cdot K_{cn}$$

Ecuación 12: esfuerzo de aplastamiento en los apoyos

$$D1 = (b + 2t)$$

Ecuación 13: ancho de distribución de carga

Donde:

F_{cn}^{Ta} = máximo esfuerzo de aplastamiento en los apoyos

$R_{m\acute{a}x}$ = máxima reacción en el tablero sobre la solera

D_1 = ancho de contacto entre el tablero y la solera

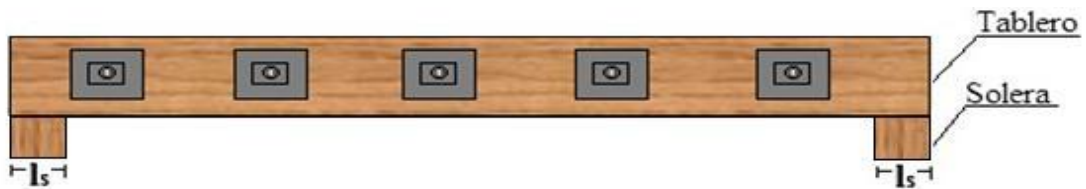
l_s = ancho de la solera

b = ancho de contacto entre el neumático y la superficie en dirección transversal

t = espesor del tablero

K_{cn} = factor de modificación por aplastamiento

Figura 10. Ancho de la solera



Fuente: tablero de puentes de madera postensados (12).

El esfuerzo máximo de aplastamiento bajo la rueda del camión de diseño se calcula con la ecuación 14.

$$F_{cn}^{br} = \frac{p}{a \cdot b} \leq F'_{cn} \cdot K_{cn}$$

Ecuación 14: máximo esfuerzo de aplastamiento bajo la rueda

Dónde:

F_{cn}^{br} = máximo esfuerzo de aplastamiento del tablero bajo la rueda

a = ancho de contacto entre el neumático y la superficie en dirección longitudinal

p = carga máxima de la rueda

5. DISEÑO DEL SISTEMA POSTENSADO

En este capítulo se describirá la forma en como el acero resiste las cargas solicitantes, sus propiedades mecánicas y el sistema estructural que conforma junto a las laminaciones de madera.

Las ecuaciones contenidas en este capítulo son analizadas a partir de el estudio e investigación por parte de Chile¹⁴ y Brasil¹⁵ a través de sus principales universidades como base de proyectos de grado y tesis de maestría.

5.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE TENSADO

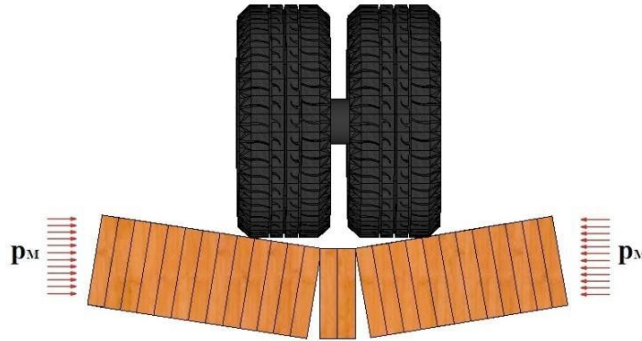
El comportamiento estructural y la resistencia del tablero depende en esencia del acero y como este transfiere las cargas solicitantes a cada pieza de madera y las mantiene unidas para generar un comportamiento de placa maciza de alta rigidez.

5.1.1 Momentos flectores transversales. A partir de ecuaciones semi-empíricas y análisis de datos, las ecuaciones 15 y 16 establecen el momento flector transversal para evitar aperturas entre las láminas de madera y es función del momento flector longitudinal sobre una viga de ancho de distribución de carga D .

¹⁴ Norma NCh174 NCh 1198 Sección 6.12. 2001.

¹⁵ Norma NBR 7190 para estructuras en madera de 1997.

Figura 11.Momento flector



Fuente: manual de diseño de un puente de madera (14).

$$M_T = \frac{60,63 \cdot M_X}{1000 C b j^{0,25}} \left(\frac{B}{L} \right)$$

Ecuación 15: momento flector para puentes de un carril

$$M_T = \frac{31,1 \cdot M_X}{1000} \left(\frac{B}{L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 16: momento flector para puentes de dos carriles¹⁶

$$P_M = \frac{6 \cdot M_T}{t^2}$$

Ecuación 17: esfuerzo de compresión por momento transversal

Dónde:

M_T = momento flector transversal (KN-m/m)

M_X = máximo momento flector longitudinal por carga viva (KN-m/m)

B = mitad del ancho del tablero

L = largo del vano del tablero

¹⁶ Momento flector para luces menores a 15 m, Norma NCh 1198 Sección 6.12. 2001.

C_{bj}= factor de uniones de tope (0,8 es un valor mínimo).

P_M= esfuerzo de compresión requerido para resistir momento transversal

t= espesor del tablero

5.1.2 Corte transversal. Es el esfuerzo máximo transversal para evitar deslizamientos entre las láminas de madera; se calcula por medio de la ecuación 18, la cual depende de la carga máxima de la rueda.

$$V_T = \frac{39,37 \cdot P}{1000} \left(10,4 - \frac{B}{L} \right)$$

Ecuación 18:corte transversal

$$P_V = \frac{1,5 \cdot V_T}{\mu \cdot t}$$

Ecuación 19:esfuerzo de compresión por corte transversal

Dónde:

V_T= corte transversal (KN/m)

P_V= esfuerzo de compresión por corte transversal

t= espesor del tablero

μ= 0,35 para madera cepillada¹⁷

μ= 0,45 para madera en bruto

P= máxima carga de la rueda del vehículo de diseño

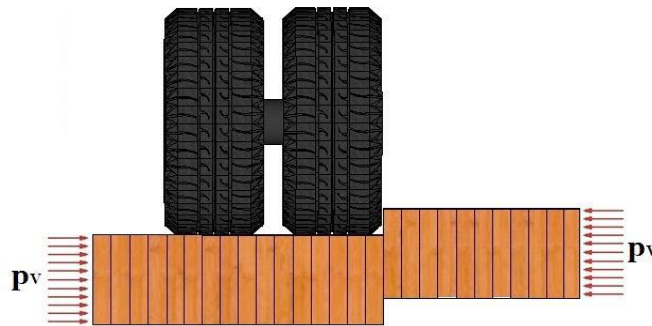
B= mitad del ancho del tablero

L= largo del vano del tablero

¹⁷ Coeficientes de fricción obtenidos para pino radiata, Norma NCh 1198 Sección 6.12. 2001.

Los coeficientes de fricción fueron obtenidos a partir de ensayos de probetas de laminaciones, estos dependen de la especie y clase de la madera. Según Norma NCh 1198 Sección 6.12. 2001, un valor óptimo para C_{bj} es 0,8.

Figura 12. Corte transversal



Fuente: tableros de madera postensados(12).

5.1.3 Nivel de tensado requerido. La tensión inicial aplicada al tablero se debe amplificar por un factor de 2, puesto que con el tiempo se pierde tensión en los elementos de acero de acuerdo a la ecuación 21; escogiendo el mayor valor entre P_M Y P_V .

$$P = P_M = P_V$$

Ecuación 20:máximo valor de esfuerzo de compresión

$$P_i = 2. P$$

Ecuación 21:mínimo valor de esfuerzo de compresión

Dónde:

P= máximo valor de esfuerzo de compresión

Pi= mínimo esfuerzo de compresión

Debido a factores tales como las pérdidas de humedad en la madera, exudación del preservante, variación de la temperatura, aplastamiento en la zona de las placas de apoyo y por creep; Se amplifica el tensado inicial para mantener un nivel de rigidez del tablero.

5.2 ESPACIAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE TENSADO

El esfuerzo de compresión entre láminasse transfiere de manera uniforme a través de las barras de acero espaciadas a una distancia S.

El área mínima requerida para las barras de acero se calcula con la ecuación 22

$$A_{smin} = \frac{P_i \cdot (S \cdot t)}{f_s}$$

Ecuación 22:área requerida para el acero

Dónde:

A_{Smin}= área requerida de la barra de acero

Pi= esfuerzo de tensado requerido

S= espaciamiento de las barras de acero

t= espesor del tablero

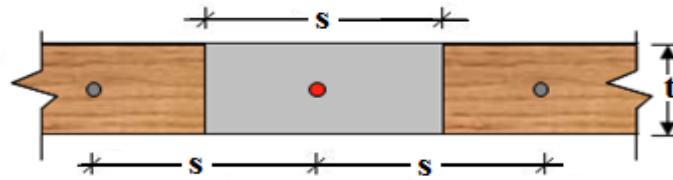
f_s= tensión admisible de las barras de tensado (f_s= 0,7f_{pu})

F_{ps}= fuerza en las barras de tensado

A_s= área de sección transversal de la barra de acero

f_{pu}= resistencia mínima ultima a tensión axial

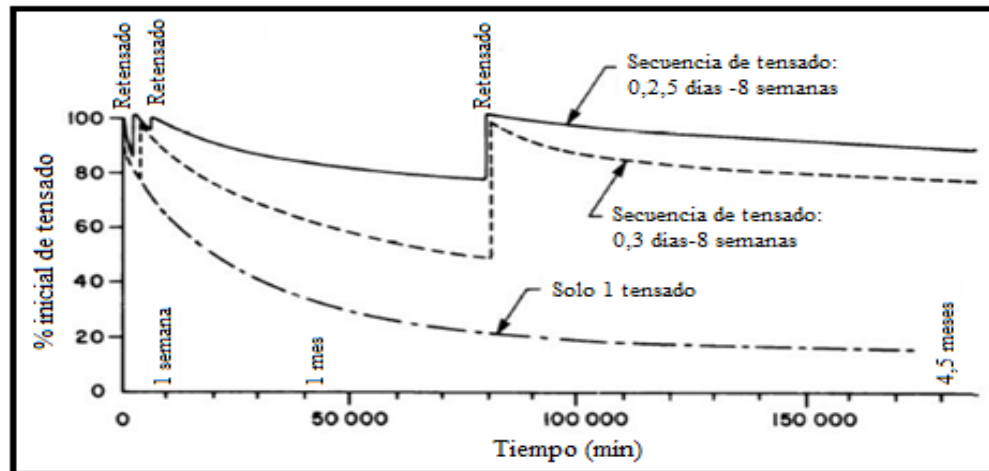
Figura 13. Espaciamiento de las barras de acero



Fuente: diseño de un puente de madera postensado (2).

La distancia entre los extremos de la madera y el centro del orificio debe ser la mitad de la separación S , las barras se colocan a la mitad del espesor del tablero t . La razón entre áreas de acero y madera se conservan para transferir esfuerzos uniformes a través de las láminas de madera, para disminuir la pérdida de postensado debido al creep en la madera y la relajación en el acero¹⁸.

Figura 14. Disminución del nivel de tensado



Fuente: manual de proyectos y construcción de puentes de madera (1)

¹⁸ Norma NBR 7190 para estructuras en madera de 1997

El **creep** es un efecto causado por los elementos de tensado, los cuales comprimen a la madera en la zona de contacto ocasionando perdidas del nivel de tensión inicial¹⁹. La pérdida en el postensado máximo debe ser un 60%, y se vuelve a tensar dentro de una semana durante el proceso constructivo y nuevamente se debetensar dos meses después del segundo tensado para garantizar un normal comportamiento de la estructura.

El valor para la cuantía de acero esta determinad por la ecuación 23.

$$\frac{A_s}{S.t} \leq 0,0016$$

Ecuación 23:cuantía del acero

La máxima fuerza que puede ser aplicada a la barra se calcula con la ecuación 24, la fuerza a aplicarse en la barra de tensado se calcula con la ecuación 25.

$$F_{PS}^{max} = f_s \cdot A_s$$

Ecuación 24:máxima fuerza a aplicarse en la barra

$$F_{PS} = P_i \cdot S.t$$

Ecuación 25:fuerza a aplicarse en la barra

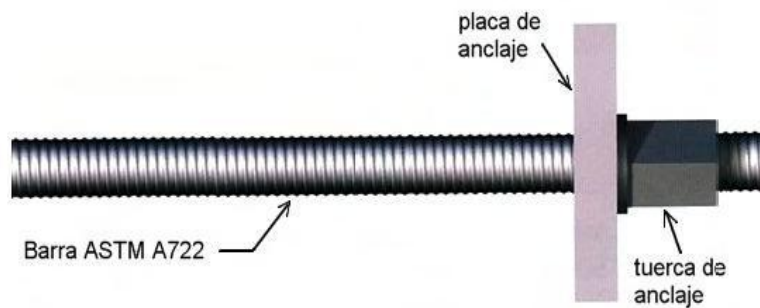
¹⁹ Norma NBR 7190 para estructuras en madera de 1997

Las barras de acero deben ser resistentes, capaces de transmitir esfuerzos y mantener el nivel de tensado²⁰.

En tableros postensados de pino radiata con espesores entre 22 cm y 25 cm, se utilizan barras de acero de alta resistencia de 5/8" de diámetro; la selección de las barras varía según las condiciones geométricas del tablero y las cargas que actúan sobre él.

Las barras de acero deben sobresalir mínimo 60 cm de cada conexión y ser protegidas de la corrosión, se usan barras galvanizadas de alta resistencia las cuales se tensan por medio de gatos hidráulicos.

Figura 15. Barra de acero ASTM A722 (NTC2142)



Fuente: manual de diseño de un puente de madera (14).

Resistencia de tracción última mínima, $f_{pu} = 1055,6 \text{ MPa}$

Tensión de fluencia mínima, $f_y = 0,8f_{pu} = 844,4 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad, $E = 205000 \text{ MPa}$

Tensión admisible máxima en las barras, $f_s \leq 0,7f_{pu}$

²⁰ Especificaciones para barras de acero ASTM A722, (NTC 2142).

Debido al proceso constructivo y control de tensado una separación de 0,5 m es un valor óptimo (8). El nivel de tensado equilibra la rigidez perdida en las conexiones de tope; siendo estas el desfase de los maderos a lo ancho del tablero cuya distancia mínima es de 1,25 m por cada 3, 4 o 5 elementos de madera cepillada. Se denomina unión de tope 1:4 al desfase por cada 4 maderos.

Las barras de acero de alta resistencia en Colombia están especificadas por la NTC, donde básicamente son las mismas resistencias mecánicas establecidas en la ASTM.

5.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLACA DE APOYO Y DE ANCLAJE

Los esfuerzos de compresión sobre las láminas ubicadas en los extremos deben ser menores a los esfuerzos de compresión normal, para este propósito se diseña la placa de apoyo. El área mínima de la placa de apoyo se calcula según la ecuación 26.

$$A_{Pmin} = \frac{F_{PS}}{F'_{cn}}$$

Ecuación 26: área mínima de la placa de apoyo

Dónde:

A_{Pmin} = área mínima requerida para la placa de apoyo

F_{PS} = fuerza aplicada en las barras de acero

F'_{cn} = esfuerzo de diseño de compresión normal a la fibra

El ancho de la placa de apoyo W_p , debe ser menor o igual al espesor del tablero. El largo de la placa L_p , se determina con la ecuación 27 y se verifica la razón de sus lados mediante la ecuación 28.

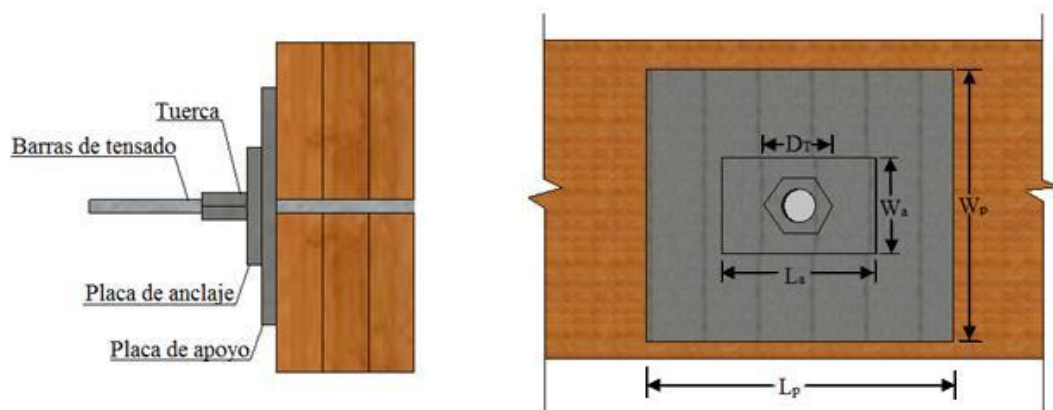
$$L_p = \frac{A_p^{\text{mín}}}{W_p}$$

Ecuación 27:largo de la placa de apoyo

$$1,0 \leq \frac{L_p}{W_p} \leq 2,0$$

Ecuación 28:razón de los lados de placa

Figura 16.Placa de apoyo y anclaje.



Fuente: tablero de puentes de madera postensados (12).

El esfuerzo de trabajo de compresión normal no debe exceder al esfuerzo de diseño de compresión para la madera seleccionada de acuerdo a la ecuación 29. El espesor mínimo para la placa de apoyo se determina con la ecuación 30.

$$F_{cn}^{TP} = \frac{F_{PS}}{A_p} \leq F'_{cn}$$

Ecuación 29:esfuerzo de trabajo de compresión

$$t_{pmín} = \left[\frac{3 \cdot F_{cn}^{TP} \cdot K_1^2}{F_s} \right]^{0,5}$$

Ecuación 30:espesor mínimo para la placa de apoyo

Dónde:

A_p = área de la placa de apoyo

L_p = largo de la placa de apoyo

W_p = ancho de la placa de apoyo

F_{cn}^{TP} = esfuerzo de trabajo de compresión en la placa de apoyo

$t_{pmín}$ = espesor mínimo para la placa de apoyo

F_s = esfuerzo de flexión admisible en la placa de acero, $F_s = 0,6f_y$

El factor K_1 depende de la geometría de la placa de apoyo y de la placa de anclaje, se calcula con la ecuación 31 con el valor máximo para K_1 .

$$K_1 = \frac{W_p - W_a}{2} = \frac{L_p - L_a}{2}$$

Ecuación 31:factor K_1 para la placa de apoyo

De forma análoga se determina el espesor mínimo para la placa de anclaje, según la ecuación 32.

$$t_{\text{amín}} = \left[\frac{3 \cdot F^{\text{Ta}} \cdot K_2^2}{F_S} \right]^{0,5}, \text{ con } F^{\text{Ta}} = \frac{F_{\text{PS}}}{A_a} = \frac{F_{\text{PS}}}{W_a \cdot L_a}$$

Ecuación 32: espesor mínimo para la placa de anclaje

El factor K_2 depende de la geometría de la placa de anclaje y la tuerca de anclaje, se determina con la ecuación 33; para el mayor valor de K_2 .

$$K_2 = \frac{W_a - D_t}{2} = \frac{L_a - D_t}{2}$$

Ecuación 33: factor K_2 para la placa de anclaje

Dónde:

A_a = área de la placa de anclaje

L_a = largo de la placa de anclaje

W_a = ancho de la placa de anclaje

F^{Ta} = esfuerzo de trabajo bajo la placa de anclaje

D_t = diámetro de la tuerca de anclaje

6. EJEMPLO DE DISEÑO

6.1 ESPECIFICACIONES DEL TABLERO

Longitud total= 9,6 m

Largo de vanos= 3 m (3 vanos)

Ancho de pasillos= 0,5 m

Ancho del tablero = 4,5 m

Ancho de apoyos = 0,2 m

Ancho de calzada= 3,6 m

Carga de diseño = C_2-S_1 + 20% por sobreuso

Carpeta de rodado asfáltica= 10 cm

Uniones de tope= 1:4

Número de carriles= 1

Espesor del tablero = 22 cm (valor mínimo para un tablero)

Ancho entre ejes del camión= 1,830 m

6.2 MATERIALES UTILIZADOS

Madera pino radiata aserrada, de clase estructural C20, en Colombia esta resistencia se denomina ES2 cuyo esfuerzo de compresión paralelo a las fibras es de 20 MPa y de escuadra 45mm*220mm.

Acero A-36 F_s = 151,8 MPa para placas de apoyo y anclaje. Barras de acero de alta resistencia ASTM A722, en Colombia se rigen las especificaciones técnicas por la NTC2142.

6.3 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO DE LA MADERA

6.3.1 Factor de modificación por humedad, K_H . La humedad de equilibrio es de 18 %, así $\Delta H = 18\% - 12\% = 6\%$. En la figura 7 con el valor de 6% se obtiene el factor de modificación para cada propiedad como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Factor de modificación por humedad, K_H

	Ff	Fcn	Ef
ΔH	6	6	6
K_H	0,85	0,8	0,9

Fuente: autores.

6.3.2 Factor de modificación por temperatura, K_T : según la NCh 1198 de 2006, sección 7.2.2.3 para temperatura ambiente mediamenor a 38°C, el factor de modificación por temperatura es 1.

6.3.3 Factor de modificación por altura, K_{hfl} : según la NCh 1198 de 2006, sección 7.2.2.3 para piezas de pino radiata con altura mayor a 90 mm; el factor de modificación por altura es 1.

6.3.4 Factor de modificación por duración de carga, K_D : según la NCh 1198 de 2006, sección 7.2.2.3 el valor para este factor es de 1,15 para carga viva.

6.3.5 Factor de modificación por trabajo conjunto, Kc: según la NCh 1198 de 2006, sección 7.2.2.3 para pino radiata este valor es de 1,3.

En la tabla 14 se muestran los valores de esfuerzos y módulo de elasticidad admisibles para madera aserrada C24 (ver sección 4.4).

Tabla 14. Esfuerzos admisibles (MPa).

	Ff	Fcn	Ef
factores de modificación	9,3	2,5	10200
KH	0,85	0,8	0,9
KD	1,15		
KT	1	1	1
KC	1,3		
Khfl	0,84		
tensiones de diseño (MPa)	F'f	F'cn	E'f
	9,93	2	9180

Fuente: autores.

6.4 DETERMINACION DEL ANCHO DE DISTRIBUCION DE CARGA

Se escoge el valor mínimo entre la ecuación 7 y 8, donde b esta determinado por la ecuación 1 (cargas de diseño). El espesor para longitudes de vanos menores a 4 m es de 22 cm.

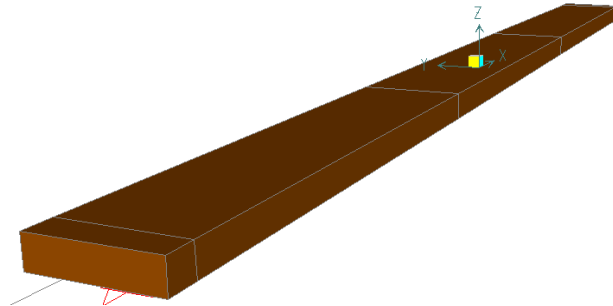
La carga de una rueda del camión de diseño P es de 53,5 kN de acuerdo al camión C₂-S₁ (H15-44).

$$b = \sqrt{0,00363 \cdot P} = \sqrt{(0,00363)(53,5)} = 0,44 \text{ m}$$

$$D = 1,3(b + t) = 1,3(0,44 + 0,22) = 0,86 \text{ m}$$

$$D = \frac{B_t}{2} = \frac{1,83}{2} = 0,92 \text{ m}$$

Figura 17. Modelamiento del tablero.



Fuente: autores (modelado en SAP 2000).

6.5 MOMENTOS MÁXIMOS DE DISEÑO

El vehículo de diseño es $C_2-S_1 + 20\%$ por sobreuso de carga. Se evalúa la posición más crítica del tren de carga en el tablero que genere la máxima sollicitación de momento. El tablero se modela por medio de SAP 2000 v14 como un elemento BEAM (ver figura 17) con un ancho de distribución de carga D y con una altura igual al espesor t del tablero. La viga está soportada por cuatro apoyos, las cargas por rueda del camión de diseño son 13,5 kN, 53,5 kN y 53,5 kN (ver figura 5). Considerando un factor de amplificación por uso tenemos:

$$(13,5)(1+0,2) = 16,2 \text{ kN}$$

$$(53,5)(1+0,2) = 64,2 \text{ kN}$$

6.5.1 Carga muerta sobre el tablero. Los pesos distribuidos superficialmente sobre el tablero son los siguientes:

Carpeta asfáltica de 10 cm de espesor= $1,85\text{kN/m}^2$

2 sistemas de baranda- guardarruedas= $0,47\text{kN/m}^2$

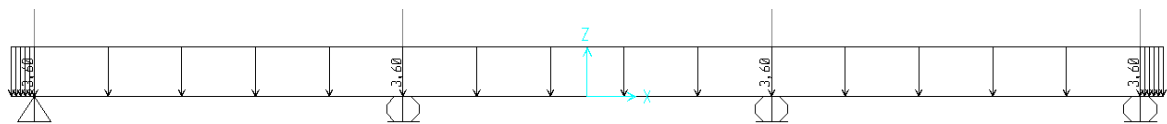
2 pasillos= $0,14\text{kN/m}^2$

Madera impregnada químicamente, Pino= $1,73\text{kN/m}^2$

La carga muerta distribuida linealmente se calcula como:

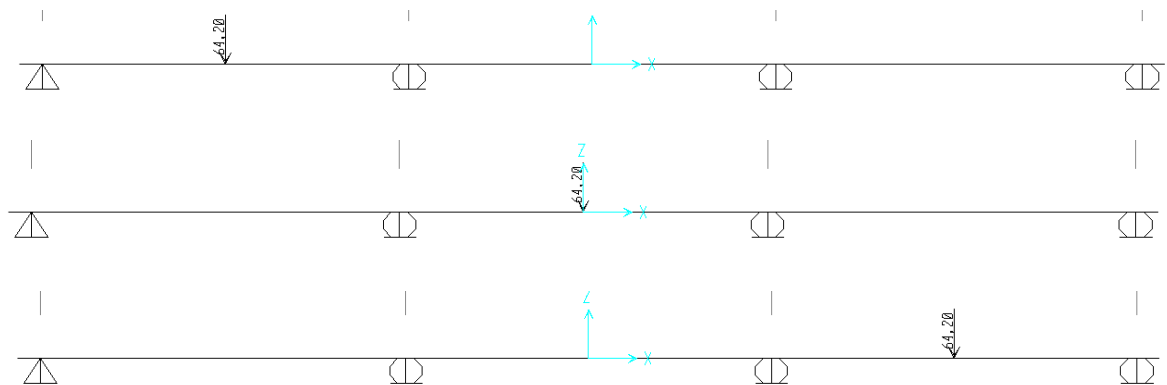
$$W_u = (1,85\text{kN/m}^2 + 0,47\text{ kN/m}^2 + 0,14\text{ kN/m}^2 + 1,73\text{ kN/m}^2)(0,86\text{m}) = 3,6\text{kN/m}$$

Figura 18. Cargas muertas distribuidas.



Fuente: autores (modelado en SAP 2000).

Figura 19. Cargas vivas en diferentes vanos.

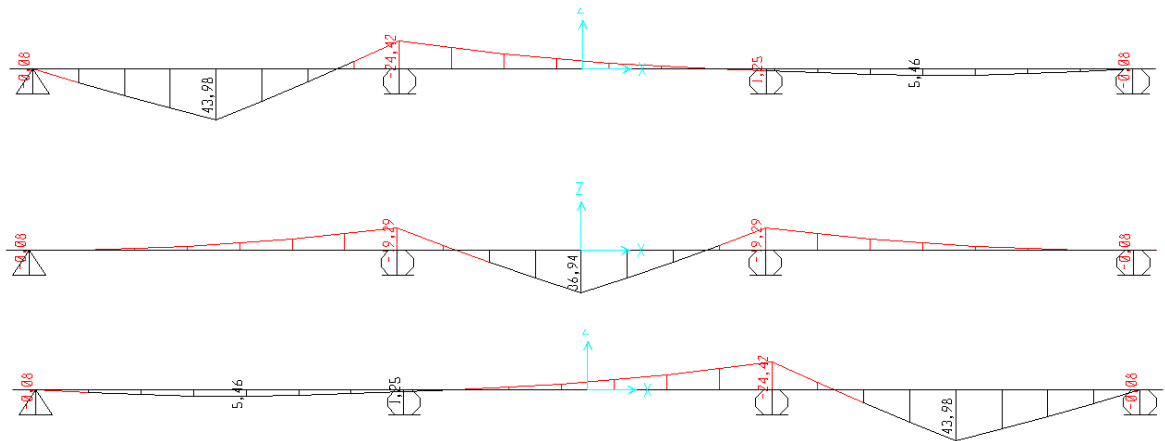


Fuente: autores (modelado en SAP 2000).

Cálculo de momentos de diseño por carga viva y carga muerta

Se toma el valor máximo de momento determinado por medio de SAP 2000, el cual es 43,98 kN-m y se produce cuando el eje trasero esta a una distancia del extremo de 1,6 m.

Figura 20. Momentos de diseño resultantes por variación del tren de carga.



Fuente: autores (modelado en SAP 2000).

En la figura 18 la posición de la carga se vario a lo largo de los 3 vanos obteniéndose diferentes resultados de momento a flexión y deflexiones, donde la posición mas crítica del vehículo genera el momento máximo y la deflexión máxima, las cuales ocurren a la mitad de la longitud de los vanos extremos.

Cálculo de esfuerzo a flexión.

Para el diseño se toman los valores máximos de momento a flexión y de deflexión obtenidos anteriormente mediante SAP 2000.

El valor del módulo de sección esta definido en la ecuación 9.

$$W = \frac{(Cb_j \cdot D) \cdot t^2}{6} = \frac{(0,8 \cdot 0,86) \cdot 0,22^2}{6} = 0,0055 \text{ m}^3$$

La flexión de determina con la ecuación 10.

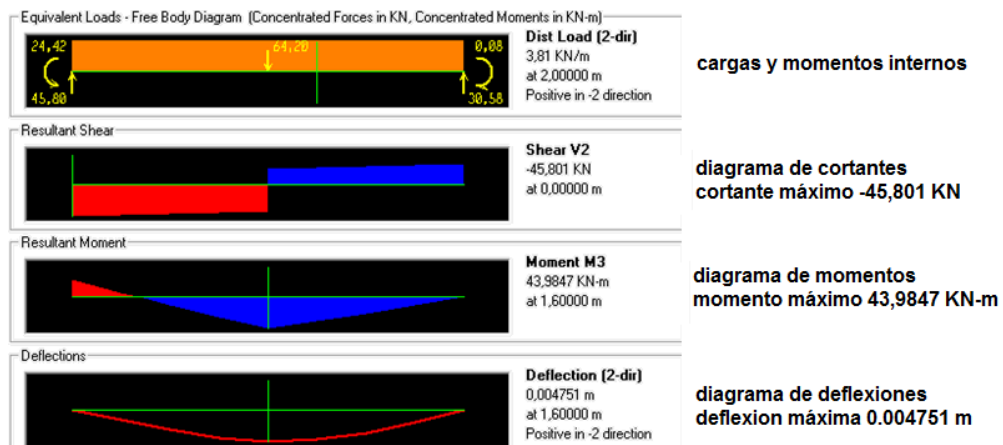
$$F_f^T = \frac{M_{\text{máx}}}{W} = \frac{43,98 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,0055 \text{ m}^3} = 7,98 \text{ Mpa} \leq F_f' = 9,93 \text{ Mpa}$$

El tablero cumple con el esfuerzo a flexión de trabajo.

Deflexión por carga viva

La deflexión máxima mediante SAP es de 4,8 mm, la cual coincide en posición con el momento máximo. Por medio de la ecuación 11 se calcula la deflexión admisible.

Figura 21. Diagramas de cortantes, momentos y deflexiones máximas.



Fuente: autores (modelado en SAP 2000).

$$\Delta_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm} \leq \frac{L}{360} = \frac{3200 \text{ mm}}{360} = 8,88 \text{ mm, cumple con la deflexión.}$$

Verificación de aplastamiento en los apoyos y bajo la rueda del camión de diseño

El esfuerzo de compresión en el apoyo, se calcula con la ecuación 12. Donde la reacción máxima producida por la posición más crítica de la carga viva sobre el tablero es 77,94 kN. D_1 se calcula con la ecuación 13.

$$D_1 = (b + 2t) = (0,44 \text{ m} + 2 \cdot (0,22 \text{ m})) = 0,88 \text{ m}$$

Con $l_s = 0,2 \text{ m}$ (ancho de los apoyos del tablero) y $K_{cn} = 0,8$

$$F_{cn}^{Ta} = \frac{R_{\text{máx}}}{D_1 \cdot l_s} = \frac{77,94 \text{ kN}}{0,88 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m}} = 0,40 \text{ Mpa} \leq F'_{cn} \cdot K_{cn} = (2 \text{ Mpa})(0,8)$$

$$F_{cn}^{Ta} = 0,40 \text{ Mpa} \leq F'_{cn} \cdot K_{cn} = 1,6 \text{ Mpa, no hay aplastamiento en los apoyos}$$

El esfuerzo de aplastamiento bajo la rueda del camión de diseño se calcula con la ecuación 14. El ancho de contacto longitudinal a se calcula con la ecuación 2.

$$a = \frac{\sqrt{0,00363 \cdot P}}{2,5} = \frac{\sqrt{0,00363 \cdot (53,5 \text{ kN})}}{2,5} = 0,18 \text{ m}$$

$$F_{cn}^{br} = \frac{p}{a \cdot b} = \frac{53,5 \text{ kN}}{(0,18 \text{ m})(0,44 \text{ m})} = 0,68 \text{ Mpa} \leq F'_{cn} \cdot K_{cn} = 1,6 \text{ Mpa}$$

6.6 CÁLCULO DEL SISTEMA TENSADO

6.6.1 Determinación del nivel de tensado

a) El momento flector se calcula con la ecuación 15 y el esfuerzo requerido para evitar la apertura de las láminas se calcula con la ecuación 17.

$$M_T = \frac{60,63 \cdot M_X}{1000 C_{bj}^{0,25}} \left(\frac{B}{L} \right) = \frac{(60,63)(43,9)}{1000(0,8)^{0,25}} \left(\frac{2,25}{3,2} \right) = 1,98 \text{ kN. m/m}$$

$$P_M = \frac{6 \cdot M_T}{t^2} = \frac{(6)(1,98 \text{ kN. m/m})}{0,22\text{m}^2} = 0,245 \text{ Mpa}$$

b) Se determina el corte transversal con la ecuación 18 y el esfuerzo requerido para evitar deslizamientos de las láminas según la ecuación 19.

$$V_T = \frac{39,37 \cdot P}{1000} \left(10,4 - \frac{B}{L} \right) = \frac{(39,37)(64,2\text{kN})}{1000} \left(10,4 - \frac{2,25 \text{ m}}{3,2 \text{ m}} \right)$$

$$V_T = 24,5 \text{ kN/m}$$

Con $\mu = 0,35$ para madera cepillada.

$$P_V = \frac{1,5 \cdot V_T}{\mu \cdot t} = \frac{(1,5)(24,5 \text{ kN/m})}{(0,35)(0,22\text{m})} = 0,47 \text{ Mpa}$$

c) La tensión requerida en las barras de acero se calcula con la ecuación 21.

$$P_i = 2.P = 2(0,47 \text{ Mpa}) = 0,95 \text{ Mpa}$$

d) en el espaciamiento de los elementos de tensado, se considera un valor S igual a 0,50 m y barras de acero con diámetro intermedio de 5/8'', con A_s de 177 mm^2 y $f_{pu} = 1055,6 \text{ MPa}$. El acero para las placas tiene f_y de 253 MPa .

El área requerida de una barra de acero se define con la ecuación 22.

$$A_{smin} = \frac{P_i \cdot (S \cdot t)}{f_s} = \frac{0,95 \text{ Mpa} \cdot (0,5 \text{ m}) \cdot (0,22 \text{ m})}{(0,7)(1055,6 \text{ Mpa})} = 141,42 \text{ mm}^2 < 177 \text{ mm}^2$$

La cuantía de acero se determina con la ecuación 23.

$$\frac{A_s}{S \cdot t} = \frac{177 \text{ mm}^2}{(500\text{mm}) \cdot (220\text{mm})} = 0,0016 \leq 0,0016$$

e) La máxima fuerza a aplicarse en la barra se calcula con la ecuación 24.

$$F_{PS}^{max} = f_s \cdot A_s = (0,7 \cdot 1055,6 \text{ Mpa}) \left(\frac{177}{1000} \text{ m}^2 \right) = 130,8 \text{ kN}$$

f) La fuerza a aplicarse en la barra de tensado se calcula con la ecuación 25.

$$F_{PS} = P_i \cdot S \cdot t = (0,95 \text{ Mpa})(0,5\text{m})(0,22\text{m}) = 105 \text{ kN} < 130,8 \text{ kN}$$

La fuerza a aplicarse en la barra debe ser menor a la fuerza máxima.

6.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLACA DE APOYO Y ANCLAJE

El área mínima para la placa de apoyo esta definido por la ecuación 26.

$$A_{P\min} = \frac{F_{PS}}{F'_{cn}} = \frac{105 \text{ kN}}{2000 \text{ kN/m}^2} = 52500 \text{ mm}^2$$

El ancho de la placa de apoyo debe ser menor o igual al espesor del tablero, se escoge un valor para W_p de 200 mm. El largo de la placa de apoyo L_p se determina con la ecuación 27.

$$L_p = \frac{A_p^{\min}}{W_p} = \frac{52500 \text{ mm}^2}{200 \text{ mm}} = 262,5 \text{ mm}; \text{ se escoge un valor de } L_p = 265 \text{ mm}$$

La razón de los lados se calcula con la ecuación 28.

$$1,0 \leq \frac{L_p}{W_p} = \frac{265 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 1,325 \leq 2,0$$

El área de la placa de apoyo es:

$$A_p = L_p \cdot W_p = (265 \text{ mm})(200 \text{ mm}) = 53000 \text{ mm}^2$$

El esfuerzo de trabajo de compresión normal a la fibra se calcula con la ecuación 29.

$$F_{cn}^{TP} = \frac{F_{PS}}{A_p} = \frac{105 \text{ kN}}{0,053 \text{ m}^2} = 1,98 \text{ Mpa} \leq F'_{cn} = 2,0 \text{ Mpa}$$

Se acepta las dimensiones de la placa.

Las dimensiones de la placa de anclaje se escogen menores a las de la placa de apoyo. $W_a = 110 \text{ mm}$ y $L_a = 140 \text{ mm}$.

El factor K_1 se determina con la ecuación 31.

$$K_1 = \frac{W_p - W_a}{2} = \frac{(200 \text{ mm} - 110 \text{ mm})}{2} = 45 \text{ mm}$$

$$K_1 = \frac{L_p - L_a}{2} = \frac{(265 \text{ mm} - 140 \text{ mm})}{2} = 62,5 \text{ mm}; \text{ se utiliza este valor.}$$

El espesor mínimo para la placa de apoyo se determina con la ecuación 30.

$$t_{p\text{mín}} = \left[\frac{3 \cdot F_{cn}^{TP} \cdot K_1^2}{F_s} \right]^{0,5} = \left[\frac{3 \cdot (1,98 \text{ Mpa}) (62,5 \text{ mm})^2}{(0,6)(253 \text{ Mpa})} \right]^{0,5} = 13 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de la placa de anclaje se calcula con la ecuación 32 y el factor K_2 se define con la ecuación 33; conociendo el diámetro de la tuerca $D_t = 30 \text{ mm}$.

$$K_2 = \frac{W_a - D_t}{2} = \frac{(110 \text{ mm} - 30 \text{ mm})}{2} = 40 \text{ mm}$$

$$K_2 = \frac{L_a - D_t}{2} = \frac{(140 \text{ mm} - 30 \text{ mm})}{2} = 55 \text{ mm}; \text{ se utiliza este valor.}$$

$$\text{con } F^{Ta} = \frac{F_{PS}}{A_a} = \frac{F_{PS}}{W_a \cdot L_a} = \frac{105 \text{ kN}}{(0,11 \text{ m})(0,14 \text{ mm})} = 6,82 \text{ Mpa}$$

$$t_{\text{amín}} = \left[\frac{3 \cdot F^{Ta} \cdot K_2^2}{F_S} \right]^{0,5} = \left[\frac{3 \cdot (6,82 \text{ Mpa})(55 \text{ mm})^2}{(0,6)(253 \text{ Mpa})} \right]^{0,5} = 21 \text{ mm}$$

A continuación se muestra la tabla 15 con resultados de momentos, deformaciones y reacciones máximas variando el área de sección transversal y la longitud de vanos.

Tabla 15.Resultados de fuerzas internas en el tablero

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				CARGAS ACTUANTES	
Y (KN/M3)	E1(kN/m2)	E2(kN/m2)	E3(kN/m2)	Wu(kN/m)	Pu(kN)
0,55	9,18E+06	5,00E+05	5,00E+05	3,6	64,2
A(m2)		L(m)	Mmax	Δmax	Rmax
D(m)	t(m)	L= 3,2 m	43,98 kN-m	4,8mm	77,94 kN
0,86	0,22	L=3,4 m	46,93 kN-m	5,73 mm	78,78 kN
		L= 3,6 m	49,9 kN-m	6,83 mm	79,62 kN
A(m2)		L(m)	Mmax	Δmax	Rmax
D(m)	t(m)	L= 3,2 m	44,02 kN-m	3,062 mm	78,08 kN
0,91	0,25	L=3,4 m	46,97 kN-m	3,7 mm	78,93 kN
		L= 3,6 m	48,64 kN-m	4,3 mm	79,78kN

Fuente: autores.

Partiendo de las propiedades mecánicas de la madera (ver tablas 2 y 3) y su comportamiento ortotrópico se realizó un primer modelamiento del tablero con área de sección transversal de 0,86mx0,22m e incrementando las longitudes de los vanos cada 20 cm partiendo de 3,2 m hasta 3,6 m; el segundo modelamiento

consistió en un área de sección transversal de 0,91mx0,25m, con longitudes de vanos variados igual que en el primer modelo.

Comparando los resultados se puede observar que las fuerzas internas en los vanos como los momentos flectores las de deflexiones máximas, tienen valores similares; por otra parte en el primer modelamiento las deflexiones para longitudes de vanos de 3,2 3,4 y 3,6 aumentaron en 1 mm. En el segundo modelamiento las deflexiones aumentaron en 0,6 mm aproximadamente; por lo tanto el tablero tuvo mejo comportamiento estructural con incrementar su espesor en tan solo 3 cm. Permitiendo de esta manera tener mayores longitudes de vanos cuyas deflexiones son admisibles.

7. CONCLUSIONES

El análisis de la madera laminada postensada como sistema estructural es complejo en la forma en como se idealiza su comportamiento mecánico y como la madera y el acero combinan sus propiedades.

La madera laminada postensada permite obtener elementos estructurales de madera mucho más flexibles, resistentes y de mayores dimensiones, donde pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la necesidad constructiva.

El acero le aporta la rigidez necesaria a cada pieza de madera para mantenerlas unidas y que se comporten como una sola, donde la fricción entre ellas es generada por los esfuerzos transmitidos mediante el acero.

Los capítulos contenidos en este texto son una compilación de información de análisis y diseño de tableros de madera de madera postensada en países como Brasil, Chile y los Estados Unidos.

Las ecuaciones descritas en los capítulos 4 y 5 son teóricas obtenidas mediante análisis estructural y corregidas con factores, los cuales ajustan su comportamiento real, tomadas de las normas NBR, NCH Y AASHTO.

Con incrementos pequeños en el espesor del tablero se observa un óptimo comportamiento interno de la estructura en cuanto a momentos flectores y reacciones generadas en los apoyos.

La madera laminada postensada como sistema estructural es en la actualidad una tecnología en desarrollo, donde se busca la mejor manera de interacción entre la madera y el acero.

8. RECOMENDACIONES

El sistema y nivel de tensado debe cumplirse en el proceso constructivo puesto que el acero es fundamental en este sistema estructural donde aporta su capacidad de transferir esfuerzos a tracción.

El grado de las especies y la clase de la madera se escoge de acuerdo a las condiciones propias del lugar de construcción y dimensiones de la estructura.

La madera aserrada seleccionada debe cumplir con las condiciones de resistencia admisibles para su uso estructural.

El acero debe cumplir con la resistencia solicitada y transmitir los esfuerzos entre los elementos de madera. Protegiéndose de la corrosión con el uso de barras galvanizadas y sobresaliendo mínimo 60 cm en cada anclaje para cuando se requiera tensar.

BIBLIOGRAFIA

- (1) CALIL JÚNIOR, Carlito. Manual de projeto e construção de pontes de madeira, Brasil. Julio de 2006. 252p.
- (2) CARCAMO, Julio Enrique. Diseño de un tablero de madera postensada. Escuela de ingeniería civil. Universidad de Concepción, Chile. 2005.
- (3) EKEBERG, Per Kristian Y SØYLAND, Ketil. Flisabridge, norway a record breaking timber bridge. ICE (Institution of Civil Engineers) Bridge Engineering. Marzo 1 del 2005. Vol 158.1-7pp.
- (4) FREEDMAN, Geoff YKERMANI, Abdy. Performance of a stress-laminated-timber arch bridge. ICE (Institution of Civil Engineers) Bridge Engineering. Diciembre 1 del 2005. Vol 158.155-164pp.
- (5) GUTKOWSKI, R. M. NATTERER, J. Y FAVRE, P. A. Field load tests of an anisotropic-grid timber bridge. Construction and Building materials. Septiembre 25 del 2006. Vol 22, 88-98pp.
- (6) HOOL G. A. Movable and long span steel bridges.
- (7) LOPEZ, William J. Historia de los puentes. 2006.
- (8) NORMA AASHTO (American Association Of State Highway and Transportation Officials) Washington, D.C. Guide specifications for the design of stress-laminated wood ridges. 2002.

(9) NORMA NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas) Projeto de estruturas de Madeira. Brasil 1997.

(10) NORMAS NCh174 yNCh 1198 (Norma Chilena Oficial). Construcciones en madera. Sección 6.12. 2001.

(11) NORMA NSR-98 Y NSR-10 (Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente), Título G. Estructuras de madera. Capítulo G.2. Bases para el diseño estructural.

(12) MUÑOS VERGARA, Jeimy. Tablero de puentes de madera postensados transversalmente. Memoria de título. Departamento de Ingeniería civil. Universidad de Concepción. Chile. 2002.

(13) OÑATE, Eugenio. Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería UPC. Barcelona España. 1992.

(14) RADDATAZ, Brian. Manual de diseño de un puente de madera. Departamento de ingeniería civil. Universidad de Valdivia, Chile. Tesis de maestría. 2006.

(15) TONIAS, Demetrios E. Y ZHAO, Jin J. Design rehabilitation, and maintenance of modern highway bridges / bridge engineering. McGraw Hill. 1995. 470p.

(16) TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo. Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la avenida Boyacá, Bogotá d.c. 2011.

ANEXO A

FUNDACIONES PARA PUENTES DE MADERA

Las fundaciones deben garantizar seguridad, funcionalidad y durabilidad.

A1. ESTUDIOS.

En las fundaciones debe cumplirse los parámetros técnicos establecidos en la norma para el diseño de elementos estructurales y de apoyo. La funcionalidad está asociada a la regulación de asentamientos diferenciales.

En el proyecto para diseñar un tipo de fundación se tiene en cuenta:

- 1) Características geotécnicas del sitio
- 2) Cargas de servicio e importancia de la obra
- 3) Topografía
- 4) Estudios de suelos (sondeos)

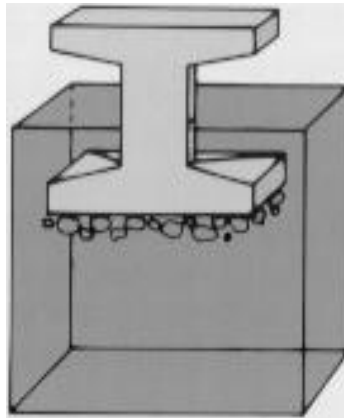
El tipo de fundación escogida debe cumplir con los requisitos técnicos y ser ejecutable con la tecnología disponible en el lugar, ensayos geotécnicos de campo, y factores del lugar, por ejemplo en USA se ve la necesidad de construcción de puentes en madera de luces pequeñas (<14m), en Brasil existe la necesidad de puentes de madera debido a las condiciones de tráfico en algunas regiones, vías de un solo sentido.

A.2 TIPOLOGIA.

Las fundaciones se dividen en dos grandes grupos:

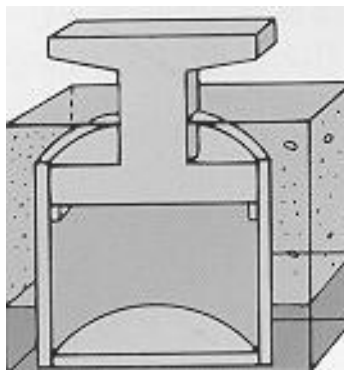
A.2.1 Fundaciones superficiales o directas (<3m de profundidad): entre las cuales se encuentran: fundaciones en bloque, zapatas, viga de fundación, zapatas combinadas, zapata continua y aisladas

Figura 22. Cimentación Zapata aislada



Fuente: tableros de madera postensada (13).

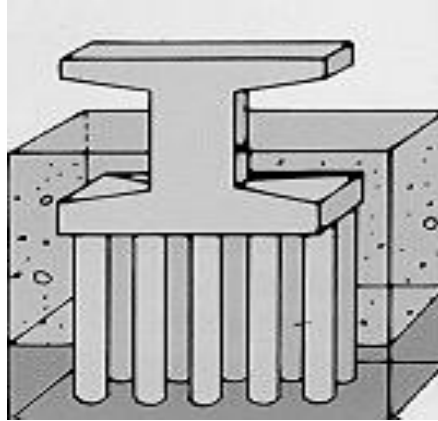
Figura 23. Cimentación Zapata corrida



Fuente: tableros de madera postensada (13).

A.2.2 Fundaciones profundas (>3m de profundidad), como: tipo estaca, tubulares (pilas y pilotes) y cajonadas (caisson).

Figura 24. Pilotes de cimentación



Fuente: tableros de madera postensada (13).

A.3 PARAMETROS.

En puentes se consideran los siguientes aspectos

- 1) Erosión
- 2) Nivel freático mínimo y máximo
- 3) Velocidad máxima de deslizamiento.
- 4) Obras de contención en los apoyos y accesos al puente. (obras para contrarrestar los efectos por alteración y empujes en el suelo ocasionadas por excavaciones)

Los tipos de muros de contención usados en puentes de madera son:

- a) Muros de gravedad
- b) Muros de flexión
- c) Muros mixtos

- d) Muros de contención
- e) Crib wall

A.4 TIPOS DE FUNDACIONES USADAS EN PUENTES DE MADERA:

A.4.1 Estacas con contención de madera. En este caso el sistema de fundación consiste en apoyar las vigas principales sobre estacas clavadas de madera que también sirven de contención formados por tablas dispuestas horizontalmente.

A.4.2 Estacas con contención mixta de gaviones de madera. Es similar al sistema anterior de fundación pero en este caso el muro de contención es de gaviones adicional a las estacas clavadas.

A.4.3 Estacas con muro de contención en madera. En este caso los muros están conformados por madera preservada de agentes biológicos dispuestos unos sobre otros.

A.4.4 Muros de gaviones. Muros conformados por rocas unas sobre otras y mantenidas unidas por medio de mallas metálicas.

A.4.5 Muros de contención de albañilería. Este sistema de fundación consiste en apoyar las vigas principales del puente directamente sobre un muro de gravedad de albañilería.

A.4.6 Estacas con contención en Crib Wall. Este sistema consiste en apoyar las vigas principales de un puente sobre estacas clavadas de madera y ensambladas con un muro crib wall, los taludes son protegidos por piedras o gaviones.

Figura 25. Muro de contención Crib Wall



Fuente: tableros de madera postensada (13).

A.4.7 Muro de gravedad en concreto. Son fundaciones en las que el muro es de concreto, son las más comunes.

A.4.8 Muro de concreto sobre estacas. Este sistema es utilizado en puentes sometidos a cargas de elevada magnitud y en suelos poco resistentes. El muro de madera se apoya sobre estacas de madera las cuales le generan mayor resistencia al suelo.

ANEXO B

CLASIFICACION ESTRUCTURAL DE LA MADERA

B.1 CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL

Se realizan ensayos de caracterización para la clasificación en el proceso de escoger la madera con base en sus propiedades mecánicas.

B.1.1 Resistencia. Capacidad para soportar los esfuerzos y reducir las deformaciones dependiendo del módulo de elasticidad del material.

B.1.2 Rigidez. Comportamiento de los elementos estructurales con relación a su funcionamiento, desplazamientos y evaluación en los estados límites de utilización de la estructura.

La clasificación estructural de la madera está basada en fallar un grupo de elementos del mismo tipo de madera teniendo en cuenta la variación en las propiedades mecánicas de la misma.

Existen varios métodos para la clasificación estructural de la madera.

B.1.3 Máquina de clasificación de esfuerzos. Mide la rigidez en el eje de menor flexión y a través de computadoras se agrupan por medio de colores en grupos de resistencia similar.

B.1.4 Parámetros de clasificación de la madera

B.1.4.1 Presencia de médula y corteza

B.1.4.2 Grietas en el núcleo

B.1.4.3Fibras de parénquima.

B.1.4.4Fibras de gran inclinación. En las piezas hasta de 12.5% en cualquier parte.

B.1.4.5Perforaciones activas. Con presencia de insectos vivos

B.1.4.6Perforaciones inactivas. Con vacíos controlados

B.1.4.7Manchas por hongos. Que presentan zonas de falla o debilidad

B.1.4.8Encanoamiento. La pieza no debe reducir su espesor nominal a más de 4 mm

B.1.4.9Arqueamiento. Es permitida una flecha máxima de 5 mm por metro, medida en relación con la compresión total de la pieza.

B.1.4.10Encorvamiento. Es permitido en piezas de más de 3m una flecha máxima de 5 mm por metro, con relación a toda la compresión del elemento

B.1.4.11Deformación de torsión.

B.1.4.12Presencia de escamas. En corte tangencial se permite desde que su profundidad no exceda 1/10 del espesor y su compresión sea menor de 1/4 de la compresión total de la pieza

B.1.4.13Grietas. Son permitidas en los extremos de las caras desde que su compresión acumulativa no sobrepase el 10% de compresión en la pieza; por lo tanto, no son permitidas en cortes limpios.

B.1.4.14 Presencia de albura. Es permitida en un borde y en una cara con la condición de que no exceda el 10% del largo de esa cara, entre tanto no son permitidos en cortes limpios, esto se debe a la resistencia y la rigidez menor que tiene una albura a una madera de núcleo en el caso de las maderas duras.

B.1.4.15 Aristas fracturadas. No son permitidas.

B.1.4.16 Variación de la sección transversal. Es permitida con tolerancia aproximada de 10%.

B.2 DURABILIDAD DE LA MADERA

La durabilidad de la madera debe garantizar un buen comportamiento en cada elemento estructural durante su vida útil y mantener su desempeño esperado centrándose en factores biológicos, ambientales y de mantenimiento.

Un diseñador puede garantizar la durabilidad usando una combinación de tres factores:

B.2.1 Mejor detalle del diseño.

- 1) Protección contra la lluvia y los rayos solares.
- 2) Drenaje rápido del agua.
- 3) Secado de las áreas húmedas.

B.2.2 Tratamiento preservativo.

- 1) Tratamiento superficial.
- 2) Preservación química bajo presión.

B.2.3 Inspección mantenimiento y reparación.

La inspección corresponde a visitas periódicas y sistemáticas para la evaluación de signos de deterioro tales como: decoloración, áreas húmedas, goteras. La reparación y el mantenimiento tienen por finalidad limpiar sistemas de drenaje del agua, adicionar coberturas donde es necesario, remover suciedades para evitar la acumulación de humedad y reforzar los acabados protectores en el tiempo adecuado.

Las propiedades deben cumplir con las condiciones mínimas estructurales de resistencia y rigidez en más del 95% del lote en prueba.

Cada trabajo de reparación se debe registrar para su posterior verificación.

B.3 DETERIORO DE LA MADERA

Es un proceso en que se alteran desfavorablemente sus propiedades y básicamente es generado por dos causas principales:

B.3.1 Agentes bióticos. Estos organismos necesitan unas condiciones particulares de oxígeno, humedad, temperatura y fuente de alimento en este caso pueden ser hongos o insectos.

Las principales características son:

B.3.1.1 Pudrimiento (hongos). La madera es un material microscópico; una alta humedad permite el desarrollo de hongos los cuales generan pérdida de resistencia, desintegración y decoloración. La humedad de la madera debe estar por debajo del 20%.

B.3.1.2 Infestación de insectos. Atacan desde adentro a la madera produciendo alteraciones de sus propiedades mecánicas.

B.3.2 Agentes abióticos. Debido a factores físicos, químicos y climáticos que pueden dañar el proceso preservativo exponiendo a la madera a agentes biológicos

B.3.2.1 Abrasión mecánica. Generalmente causado por el desgaste generado por los vehículos en la superficie de rodamiento disminuyendo la sección efectiva de la madera y daños por sobrecargas produciendo hundimientos diferenciales.

B.3.2.2 Luz ultravioleta. La acción de la luz ultravioleta del sol degrada químicamente a la lignina de la superficie de la madera, disminuye su resistencia mecánica.

B.3.2.3 Corrosión. Se presentan en las conexiones y apoyos con elementos metálicos donde ocurren reacciones químicas entre el hierro y las células de la madera reduciendo sus propiedades y degradándose, incluso pueden permitir la presencia de hongos.

B.3.2.4 Degradación química. Deterioro de la madera a partir de reacciones con ácidos que atacan la celulosa, hemicelulosa y lignina de la madera causando pérdida de resistencia.

B.3.2.5 Remoción de madera. Producida por trabajos de carpintería donde se disminuye las secciones transversales efectivas y a su vez la capacidad resistente.

B.3.2.6 Movimientos y distorsiones.

B.3.2.7 Inestabilidad. Causada por movimientos de pórticos, desplazamientos laterales excesivos y falta de barras de contraviento.

B.3.2.8 Desplazamientos. Usualmente son producidos por cargas mayores o efecto de secado a partir de una condición verde.

B.3.2.9 Agrietamientos. Son el efecto de secado de madera verde, exposición al fuego de altas temperaturas.

B.4 PRESERVACIÓN DE LA MADERA.

En un ambiente constructivo se tienen unas medidas preventivas para proteger a la madera de los agentes biológicos, físicos y químicos de acuerdo a la madera, obra a desarrollar, lugar de la obra; se escoge el proceso adecuado de preservación.

B.4.1 Selección de la especie de madera.

Para la selección se tienen en cuenta algunos parámetros:

B.4.1.2 Durabilidad natural de la madera. Resistencia al ataque de insectos, hongos otros agentes biológicos, químicos y físicos.

B.4.1.3 Tratabilidad.

B.4.1.4 Impregnabilidad. Propiedad intrínseca de cada especie.

B.4.2 Madera de reforestación. Eucalipto y Pino. En Santander (Colombia) existe un programa de reforestación.

B.4.2.1 Eucalipto. Es una madera resistente de uso en varios países y con diferentes aplicaciones dentro de las construcciones civiles.

B.4.2.2 Pino. Es una madera reforestable la cual tiene menor peso específico. Una estructura que contenga la mayoría de sus elementos con pino tendrá fundaciones más simples y ahorro de material porque todos sus componentes pueden ser prefabricados. La madera de pino es considerada de baja resistencia mecánica y durabilidad natural, pero tiene una alta permeabilidad que la hace tratable y cuya vida útil puede ser superior a 50 años.

B.4.3 Producto preservativo.

De acuerdo a la madera escogida y sus propiedades físicas y mecánicas evaluamos la clase de riesgo. La retención mínima y la penetración de los preservantes para cada clase de riesgo se muestran en las tablas 16,17 y 18.

Tabla 16. Clase de riesgo 4

APLICAÇÃO	MÉTODO DE TRATAMENTO	PRESERVATIVO		RETENÇÃO MÍNIMA kg/m ³ (l.a.)	PENETRAÇÃO
		Inseticida	Fungicida		
Madeira serrada, roliça e laminada (seca)	Sob pressão (d)	CCA – C ou CCB		4,0 ou 6,5 (b)	100 % do alborno e porção permeável do ceme
		Óleo creosoto (c)		96	
Painel compensado		CCA – C ou CCB		4,0 ou 6,5 (b)	100 % do alborno e porção permeável do ceme

Fuente: Manual de projeto e construção de pontes de madeira(1).

Tabla 17.Clase de riesgo 5

APLICAÇÃO	MÉTODO DE TRATAMENTO	PRESERVATIVO (Inseticida e fungicida)	RETENÇÃO MÍNIMA kg/m ³ (i.a.)	PENETRAÇÃO
Madeira serrada, roliça, laminada e Painel compensado	Sob pressão (a)	CCA – C	6,5 9,6 (b)	100 % do alburno e porção permeável do cerne
		CCB (d)	12,8 (e)	
		Óleo creosoto (c)	96 130 (b) 192 (e)	

Fuente: Manual de projeto e construção de pontes de madeira(1).

Tabla 18.Clase de riesgo 6

APLICAÇÃO	MÉTODO DE TRATAMENTO	PRESERVATIVO	RETENÇÃO MÍNIMA kg/m ³ (i.a.)	PENETRAÇÃO
Madeira serrada, Madeira roliça e Painel compensado	Sob pressão (a)	CCA – C	40	100 % do alburno e porção permeável do cerne
		Óleo creosoto	400	
	Sob pressão duplo tratamento (a) (f)	CCA – C e	24	
		Óleo creosoto	320	

Fuente: Manual de projeto e construção de pontes de madeira(1).

B.4.4 Métodos y tratamientos.

Se escoge el método teniendo en cuenta la clase de riesgo y producto seleccionado.

B.4.4.1 Retención (Kg/m³). Producto activo/volumen de la madera.

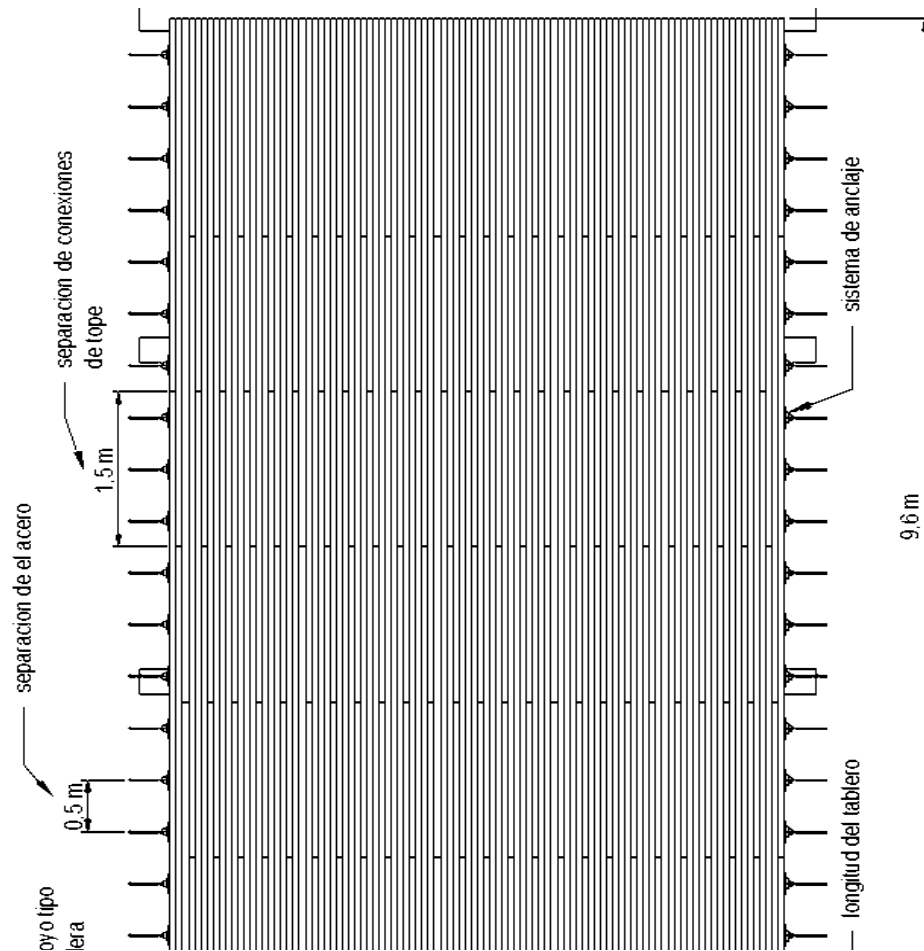
B.4.4.2 Penetración del producto preservativo (mm). Para maderas utilizadas en puentes el método de tratamiento es solo presión con productos preservativos de naturalezas hidrosolubles y/o aceitosos.

ANEXO C

PLANOS DEL TABLERO DE MADERA Y DETALLE DE ANCLAJE

C.1 DIMENSIONES DE EL TABLERO DE MADERA POSTENSADA

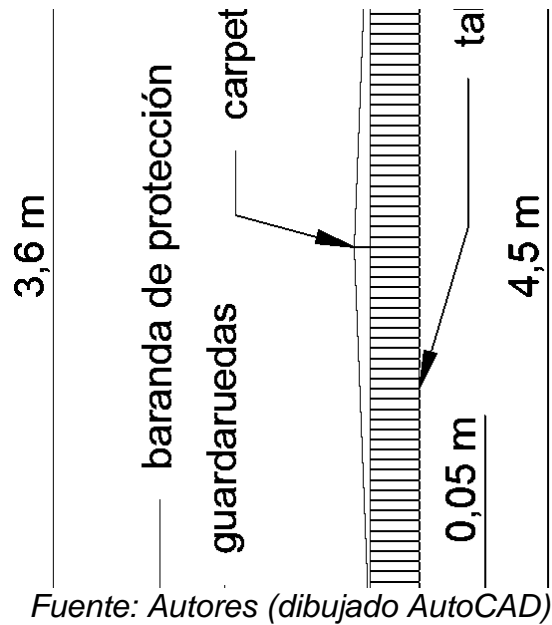
Figura 26. Vista en planta, uniones de tope.



Fuente: Autores (dibujado AutoCAD)

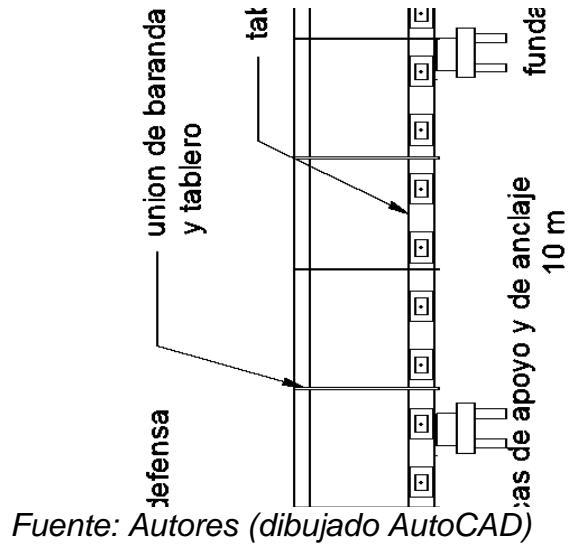
C.2 SECCION TRANSVERAL DEL TABLERO

Figura 27. Sección transversal



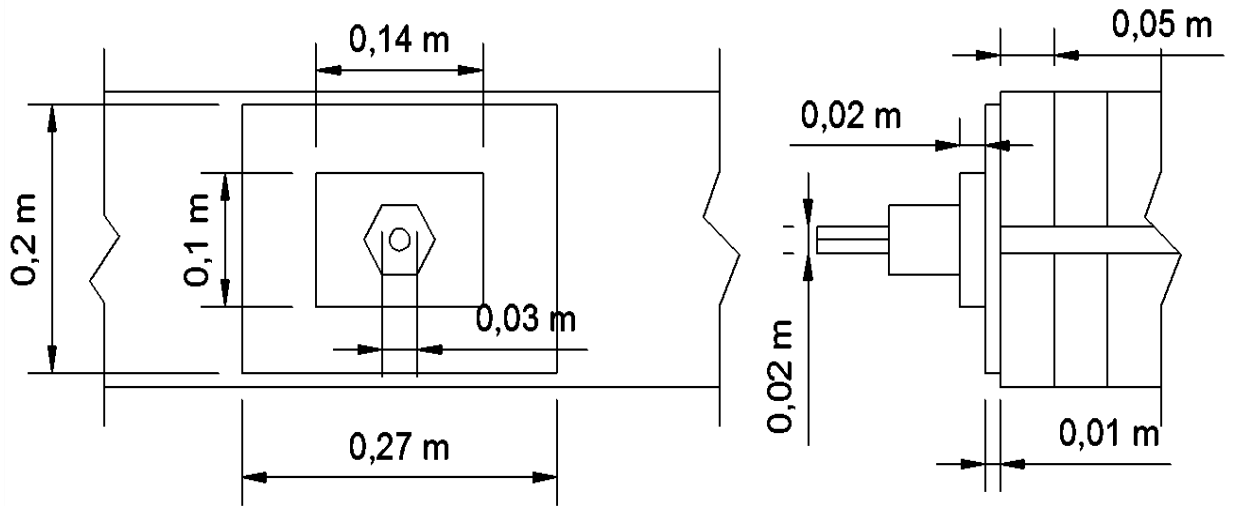
C.3 VISTA LATERAL DEL TABLERO POSTENSADO

Figura 28. Vista lateral del tablero postensado



C.4 DETALLE DE LAS PLACAS DE APOYO Y DE ANCALJE

Figura 29. Placas de anclaje y de apoyo.



Fuente: Autores (dibujado AutoCAD)